卓越工程师培养计划

EDA

http://www.phei.com.cn



冯新宇　蒋洪波　编著



ADS2012

射频电路设计与仿真

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

卓越工程师培养计划

ADS2012 射频电路设计与仿真

冯新宇　蒋洪波　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以“使广大学生和工程技术人员掌握先进的电子电路设计和实验方法，适应现代电子电路设计自动化潮流，初步具备电子电路设计和测试能力”为目标，由浅入深地介绍了利用 ADS2012 软件进行电路设计和仿真的方法与技巧，并通过大量实例讲解电路仿真和设计的基本过程。同时各章还配备了思考题，通过“学、例、练”的方式，加深读者对知识的学习和运用能力。

本书内容丰富、实用，以实例贯穿全书，非常适合从事射频电路设计的工程技术人员阅读使用，也可以作为高等院校电子信息、通信工程、自动化、电气控制等相关专业的教学用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

ADS2012 射频电路设计与仿真 / 冯新宇，蒋洪波编著. —北京：电子工业出版社，2014.1
（卓越工程师培养计划）
ISBN 978-7-121-22243-6

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①冯… ②蒋… Ⅲ. ①射频电路－电路设计－计算机辅助设计－软件包 Ⅳ. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 315403 号

策划编辑：张 剑（zhang@phei.com.cn）
责任编辑：刘真平
印 刷：三河市鑫金马印装有限公司
装 订：三河市鑫金马印装有限公司
出版发行：电子工业出版社
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036
开 本：787×1 092 1/16 印张：23 字数：588 千字
印 次：2014 年 1 月第 1 次印刷
印 数：3 000 册 定价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前　言

计算机和信息技术的发展，以及人们对电子系统设计的新需求，推动了电子线路设计方法和手段的进步。传统的设计手段逐步被 EDA 所取代，它代表着现代电子系统设计的潮流。EDA 技术的发展和推广极大地推动了电子工业的发展。EDA 技术是现代电子工业中不可缺少的一项技术，掌握 EDA 技术是广大电子类高校学生就业的一个基本条件，也是工程技术人员的有力助手。ADS 系列软件是安捷伦（Agilent）科技有限公司推出的微波电路和通信系统仿真软件，是当今业界最为流行的微波射频电路、通信系统、RFIC 设计软件，也是国内高校、科研院所和大型 IT 公司使用最多的软件之一，受到各界好评，尤其在教育领域取得了巨大成功，许多院校已把 ADS 作为电子类专业课程教学和实验的一种辅助手段。

2012 年年初，安捷伦科技有限公司推出了 ADS2012 开发套件。ADS2012 的主要特点是为射频体系结构应用提供与 Agilent GENESYS 软件的设计链接，它有助于更快地生成复杂的高频系统和电路设计。ADS2012 提供多个用户界面增强特性，旨在改善工程师的设计效率。可驻留窗口支持用户快速访问常用的对话框，如元件信息和版图层可视化窗口。新增的元件搜索和网络节点浏览功能可让用户轻松地完成大型设计。新的工程归档/解档实用程序可使设计和工程项目的共享变得更简单。更新了两个重要的 ADS 射频设计指南。ADS 负载牵引设计指南现在包括失配仿真，给出器件或放大器对负载电压驻波比或相位角的灵敏度。放大器设计指南增添了多项更新，可轻松查看在指定输出功率或增益压缩上的放大器性能。

本书是在 ADS2009 设计电路仿真与设计的基础上的升级版，对原教材不合理的地方进行了修改，对错误的地方进行了修正，更好地探讨了在现代电子信息领域的综合应用的方法。

本书结合了作者多年实际设计的经验和体会，采用理论讲解与实例演示相结合的讲述方法，简明清晰、重点突出，在叙述上力求深入浅出、通俗易懂，相信会为读者的学习和工作带来一定的帮助。

读者对象

本书面向的是电子电路工业领域的学生和工程技术人员，包括：

- ADS2012 技术的初学者
- 具有一定电路设计基础知识的中级读者
- 从事电子系统设计的专业技术人员
- 学习 ADS2012 设计的在校大中专学生

为了方便读者的学习，书中所有实例和练习的源文件，以及用到的素材都能够从零点工作室网站下载。

本书由冯新宇担任主要的编写工作，其中冯新宇完成第 1～10 章的仿真工作，蒋洪波完成第 11～18 章的仿真工作。参与本书编写的人员还有车向前、穆秀春、杨广学、王冲、边莉、乔文亮、管殿柱、李文秋、宋一兵、王献红、谈世哲、付本国、初航、赵景波及赵景伟等。

感谢您选择了本书，希望我们的努力对您的工作和学习有所帮助，也希望您把对本书的意见和建议告诉我们。

零点工作室网站 http://www.zerobook.net
电子函件 gdz_zero@126.com

编著者

目　录

第 1 章　ADS2012 简介 …… 1
1.1　ADS2012 概述 …… 1
1.2　ADS2012 安装过程 …… 7
1.3　ADS2012 操作窗口介绍 …… 13
第 2 章　ADS2012 基本操作及元件 …… 23
2.1　ADS2012 基本操作 …… 23
2.2　ADS2012 元件 …… 32
第 3 章　ADS2012 仿真基础 …… 40
3.1　电路仿真基础 …… 40
3.1.1　电路仿真基本操作 …… 40
3.1.2　利用谐波平衡法对放大器仿真 …… 45
3.2　系统仿真基础 …… 48
3.2.1　系统仿真基本操作 …… 48
3.2.2　系统仿真 …… 49
3.3　思考题 …… 56
第 4 章　直流仿真 …… 58
4.1　直流仿真基本原理及功能 …… 58
4.2　直流仿真面板与仿真控制器 …… 59
4.3　直流仿真的一般过程 …… 63
4.4　ADS 中直流仿真案例 …… 64
4.4.1　BJT 仿真 …… 64
4.4.2　带参数扫描的直流仿真 …… 66
4.5　直流仿真实例 …… 67
4.5.1　子电路创建方法 …… 67
4.5.2　直流特性分析 …… 71
4.5.3　偏置网络分析 …… 73
4.5.4　温度扫描 …… 76
4.6　思考题 …… 77
第 5 章　交流仿真 …… 78
5.1　交流仿真基本原理及功能 …… 78
5.2　仿真面板与仿真控制器 …… 79
5.3　交流仿真的一般步骤 …… 86
5.4　ADS 中交流仿真案例 …… 86

5.4.1 功率放大器交流仿真 …… 86
5.4.2 功率放大器噪声分析 …… 87
5.5 交流仿真实例 …… 89
5.5.1 交流小信号分析 …… 89
5.5.2 多参数扫描 …… 94
5.6 思考题 …… 97
第 6 章 S 参数仿真 …… 99
6.1 S 参数仿真基本原理及功能 …… 99
6.2 S 参数仿真面板与仿真控制器 …… 101
6.3 S 参数仿真的一般过程 …… 105
6.4 ADS 中 S 参数仿真案例 …… 106
6.5 S 参数仿真实例 …… 108
6.5.1 基本 S 参数仿真 …… 108
6.5.2 匹配电路设计 …… 113
6.5.3 参数优化 …… 119
6.5.4 噪声和增益 …… 125
6.5.5 S2P 文件操作 …… 126
6.6 思考题 …… 129
第 7 章 谐波平衡法仿真 …… 130
7.1 谐波平衡法仿真基本原理及功能 …… 130
7.2 谐波平衡法仿真面板与仿真控制器 …… 130
7.3 谐波平衡法仿真的一般步骤 …… 137
7.4 ADS 中谐波平衡法仿真例程 …… 137
7.4.1 单音信号 HB 仿真 …… 137
7.4.2 参数扫描 …… 138
7.5 谐波平衡法仿真实例 …… 140
7.5.1 单音信号仿真 …… 140
7.5.2 压缩功率输出 …… 145
7.5.3 双音谐波平衡仿真 …… 149
7.5.4 三阶交调点的仿真 …… 151
7.6 思考题 …… 153
第 8 章 电路包络仿真 …… 154
8.1 电路包络仿真基本原理及功能 …… 154
8.2 电路包络仿真面板与仿真控制器 …… 155
8.3 电路包络仿真基本过程 …… 157
8.4 ADS 中电路包络仿真例程 …… 158
8.5 电路包络仿真实例 …… 160
8.5.1 运算放大器包络仿真 …… 160
8.5.2 GSM 源包络仿真 …… 165

8.5.3　1.9GHz 的 GSM 放大器包络仿真 …… 168
8.5.4　信道功率仿真 …… 172
8.6　思考题 …… 173
第 9 章　功率分配器的设计与仿真 …… 174
9.1　功分器的基本原理 …… 174
9.2　集总参数功分器设计及仿真 …… 175
9.2.1　等分型功分器 …… 175
9.2.2　等分型功分器设计实例 …… 176
9.2.3　比例型功分器 …… 177
9.2.4　比例型功分器设计实例 …… 178
9.3　Wilkinson 功分器设计及仿真 …… 179
9.3.1　Wilkinson 功分器设计 …… 179
9.3.2　电路仿真与优化 …… 181
9.3.3　版图仿真 …… 184
9.4　思考题 …… 186
第 10 章　微波滤波器的设计与仿真 …… 187
10.1　滤波器的基本原理 …… 187
10.2　利用传统法设计集总参数滤波器 …… 191
10.2.1　低通滤波器设计及仿真 …… 191
10.2.2　带通滤波器设计及仿真 …… 193
10.3　利用 ADS 工具设计集总参数滤波器 …… 194
10.3.1　滤波器电路的生成 …… 194
10.3.2　滤波器的仿真 …… 197
10.4　分布参数滤波器设计 …… 198
10.4.1　微带带通滤波器的设计 …… 199
10.4.2　电路优化及仿真 …… 201
10.5　思考题 …… 203
第 11 章　低噪声放大器设计与仿真 …… 204
11.1　低噪声放大器的基本原理 …… 204
11.2　低噪声放大器的设计 …… 206
11.2.1　晶体管直流工作点扫描 …… 206
11.2.2　晶体管 S 参数扫描 …… 207
11.2.3　输入阻抗测试 …… 209
11.2.4　输入匹配设计 …… 210
11.2.5　输出匹配设计 …… 213
11.2.6　完整原理图 …… 215
11.3　思考题 …… 216
第 12 章　镜像抑制混频器的设计与仿真 …… 217
12.1　混频器的工作原理 …… 217

12.2 镜像抑制混频器的设计 ……220
12.2.1 3dB 定向耦合器设计 ……220
12.2.2 低通滤波器设计 ……221
12.2.3 完整的混频器电路 ……222
12.3 镜像抑制混频器的仿真 ……223
12.3.1 变量设置 ……223
12.3.2 仿真器配置 ……224
12.3.3 噪声系数仿真 ……225
12.3.4 噪声系数分析 ……225
12.4 思考题 ……227
第 13 章 压控振荡器的设计与仿真 ……228
13.1 振荡器的基本原理 ……228
13.1.1 主要技术指标 ……228
13.1.2 常用元件 ……230
13.2 振荡器初始电路设计与仿真 ……231
13.2.1 元件选取 ……231
13.2.2 初始电路 ……231
13.2.3 偏置电路 ……232
13.2.4 优化仿真 ……233
13.3 可变电容 VC 特性曲线测试 ……234
13.4 压控振荡器仿真分析 ……235
13.4.1 瞬时仿真 ……235
13.4.2 参数调整 ……237
13.4.3 谐波仿真 ……238
13.4.4 振荡频率线性度分析 ……239
13.5 思考题 ……241
第 14 章 微带天线的设计与仿真 ……242
14.1 微带天线的基础知识 ……242
14.2 矩形微带天线 ……243
14.3 矩形微带天线设计 ……245
14.3.1 几何参数计算 ……245
14.3.2 版图初步仿真 ……247
14.3.3 匹配优化设计 ……251
14.3.4 版图仿真 ……253
14.4 思考题 ……254
第 15 章 印刷偶极子天线的设计与仿真 ……255
15.1 印刷偶极子天线简介 ……255
15.2 设计过程 ……256
15.2.1 天线模型建立 ……256

15.2.2　优化仿真 ……257
15.3　思考题 ……264
第 16 章　ADS2012 系统仿真 ……265
16.1　收发信机基本理论 ……265
16.2　零中频接收机仿真 ……266
16.2.1　创建新项目 ……266
16.2.2　射频前端电路的搭建 ……266
16.2.3　接收机频带选择性仿真 ……267
16.2.4　下变频电路的搭建 ……267
16.2.5　模拟基带部分电路的搭建 ……268
16.2.6　接收机信道选择性仿真 ……269
16.2.7　接收机系统预算增益仿真 ……270
16.2.8　接收机下变频分析 ……272
16.3　超外差接收机仿真 ……273
16.3.1　本振输出功率对接收机性能的影响 ……275
16.3.2　整机增益随本振功率的变化 ……276
16.4　发射机预算增益仿真 ……277
16.5　思考题 ……279
第 17 章　基于 DSP Design 的设计 ……280
17.1　DSP 设计的基本理论 ……280
17.2　DSP Design 的重要概念和特征 ……281
17.2.1　位到符号表的转换 ……282
17.2.2　不同的映射方法实现位到符号表的转换 ……284
17.2.3　信号类型 ……285
17.2.4　数据流仿真的方法 ……289
17.3　16QAM 调制/解调模块设计 ……294
17.3.1　理想升余弦滤波器特性 ……294
17.3.2　设计一个数字调制器 ……298
17.3.3　设计一个数字解调器 ……301
17.3.4　噪声和失真的影响测试 ……303
17.4　思考题 ……304
第 18 章　W-CDMA/3GPP 通信系统设计 ……305
18.1　3GPP 关键技术概述 ……305
18.1.1　3G 通信网络发展趋势及特点 ……305
18.1.2　3G 主流标准概述 ……306
18.2　W-CDMA/3GPP 通信系统仿真概述 ……308
18.3　直接序列展频技术仿真 ……309
18.3.1　扰码技术仿真 ……309
18.3.2　交织码技术仿真 ……312

18.3.3 扩频技术仿真 ……313
18.4 基站信号仿真 ……319
18.4.1 逻辑信道仿真 ……319
18.4.2 射频功率测量 ……323
18.4.3 CCDF 测量 ……324
18.4.4 利用 WCDMA3G_CCDF 测量 ……325
18.4.5 非线性电路对频谱和 CCDF 的影响 ……326
18.5 用户设备信号仿真 ……329
18.5.1 逻辑信道仿真 ……329
18.5.2 射频功率测量 ……330
18.5.3 CCDF 测量 ……331
18.6 用户设备发射机仿真 ……333
18.6.1 UE 发射机模块 ……334
18.6.2 最大发射功率 ……334
18.6.3 CCDF 测量 ……335
18.6.4 占有带宽 ……336
18.6.5 频谱杂散模板 ……338
18.6.6 相邻频道泄漏比 ……340
18.6.7 误差向量幅度 ……342
18.6.8 码域功率谱 ……343
18.6.9 峰值码域误差 ……344
18.7 用户设备接收机仿真 ……346
18.7.1 UE 接收机模块 ……346
18.7.2 CCDF 测量 ……346
18.7.3 参考灵敏度 ……348
18.7.4 最大输入电平 ……349
18.7.5 邻道选择性 ……351
18.7.6 阻塞特性测试 ……353
18.8 思考题 ……354
参考文献 ……355

第 1 章　ADS2012 简介

先进设计系统（Advanced Design System，ADS）是领先的电子设计自动化软件，适用于射频、微波和信号完整性应用。ADS 是获得商业成功的创新技术的代表，这些技术已被无线通信与网络以及航空航天与国防领域中的领先厂商广泛采用。对于 WiMAX™、LTE、多千兆位/秒数据链路、雷达和卫星应用，ADS 能够借助集成平台中的无线库以及电路系统和电磁协同仿真功能提供基于标准的全面设计及验证。



1.1　ADS2012 概述

先进设计系统（ADS）2012 包含以下最新的增强功能：

☺ 针对射频功率放大器设计的技术突破和创新——包括多芯片模块电磁场 FEM 仿真、为新的 Agilent NeuroFET 模型提供支持、新型电热仿真器、ADS 负载牵引和放大器设计指南的多项更新。

☺ 可用性改进——包括轻松共享工作区（归档/解档）、停靠窗口、高效的搜索和导航功能、三维电磁场元件集成。

☺ 提高与 EMPro 的整合程度——EMPro2012 包括与 ADS2012 的进一步整合，以及对仿真器的多项增强，以便改善产品性能和加快产品开发。

1．ADS2012 的主要特性及新功能

安捷伦先进设计系统（ADS）2012 具备新的功能，可改善所支持应用的工作效率，并为 GaAs、GaN 和硅质射频功率放大器多芯片模块设计提供突破性技术。

【技术突破和创新】针对射频功率放大器设计的技术突破和创新包括:

☺ 多芯片模块有限元方法（FEM）电磁场仿真可以分析 IC 和互连之间的电磁场交互，典型多芯片功率放大器模块中的导线焊接和倒装芯片焊接凸点。

☺ 针对新型人造神经网络的 Agilent NeuroFET 模型（通过 Agilent EEsof IC-CAP 器件建模软件提取）提供模型支持，获得更精确的 FET 建模和仿真结果（例如大功率 GaN FET 放大器）。

☺ 提高与 Electromagnetic Professional（EMPro）软件的整合程度。EMPro 中的三维电磁元件现在可以另存为数据库单元，直接在 ADS 中使用。

☺ 新型 ADS 电热仿真器。它以整合到 ADS 的全三维热求解程序为基础，结合了动态温度效应，以提高“热感知”电路仿真结果的精度。

☺ ADS 负载牵引设计指南增添了多项更新，包括失配仿真，用于表示器件或放大器对负载 VSWR 或相位角的灵敏度。

☺ 放大器设计指南增添了多项更新，可轻松查看在特定输出功率或增益压缩上的放大

器性能。

【用户界面和设计管理】

☺ 停靠窗口和选项卡式窗口以及对话框。

☺ 元件搜索——快速查找设计层中的对象。

☺ 网络领航员——确认节点连通性。

☺ 灵活的归档和解档——实现工作区的资源共享。

☺ 增添了数十种原理图和版图用户界面改进。

☺ 支持第三方设计管理/版本控制工具（Cliosoft）。

【版图】

☺ 创建多层互连——复制和扩大简单与复杂的结构。

☺ 把元件锁定在固定位置。

☺ 标尺和尺寸线的改进。

☺ ADS 台式 LVS 的改进。

☺ 版图命令行编辑器——启用 cookie 剪切器，能够移除版图中的全部导线。

【仿真】

☺ 更快的线性速度——自动启用线性控制器中的线性网络人字板（Linear Network Collapser）。

☺ 改善聚合/扫描特性——如果遇到聚合问题，忽视并继续操作。

☺ 并行计算——更快速的瞬态 GPU、仿真管理器使用瞬态/聚合 8 个一组许可证对并行仿真器进行设置和控制。

【提高与 EMPro 的整合程度】

☺ 与 ADS 进一步整合——通用数据库允许用户将三维元件内置 EMPro 直接放置到 ADS 原理图和版图中。EMPro 与 ADS 共享数据库，为两者的更紧密整合奠定了基础。EMPro 中的三维对象可以另存为 ADS 设计数据库中的“元件（cell）”，直接在 ADS 中使用。例如，在 EMPro 中创建的 3-DSMA 连接器元件，其“元件视图”现在可以直接放置到 ADS 原理图中进行电路/电磁协同仿真，或放置到 ADS 版图（例如用于射频印制电路板）中，在 ADS 中进行全面的三维电磁仿真。直接集成可优化设计流程，使电路设计人员能够更早地使用全面的三维电磁场建模能力。只有 ADS2012 才能提供三维电磁场分析和射频/高速产品设计之间的这种互操作性。

☺ 全新低频分析算法——改善 100MHz 以下的仿真精度（包括直流 DC）。高频电路仿真需要在直流和低频范围内生成精确、稳定的结果。EMPro2012 还将在电磁仿真技术方面引入多项改进。全新低频分析算法可改善有限元法仿真在 100MHz 以下（包括直流）的仿真精度。以前的 FEM 求解程序很难在直流和低频范围内生成精确、稳定的结果，无法满足后续的电路仿真甚至更高频率应用的需求。

☺ FEM 网格技术使速度提升 50%——安捷伦还提供增强的 EMProFEM 网格技术，以便提高速度（通常加快 50％）和稳定性。

2．ADS 仿真设计方法

ADS 软件可以对电路进行模拟，完成射频/微波等电路及通信系统设计，主要包括以下几种分析和仿真方法。



【高频 SPICE 分析和卷积分析】高频 SPICE 分析方法提供如 SPICE 仿真器般的瞬态分析，可分析线性与非线性电路的瞬态效应。在 SPICE 仿真器中，无法直接使用的频域分析模型，如微带线、带状线等，可在高频 SPICE 仿真器中直接使用。因为在仿真时高频 SPICE 仿真器会将频域分析模型进行拉式变换后进行瞬态分析，而不需要用户将该模型转化为等效 RLC 电路。所以高频 SPICE 除了可以做低频电路的瞬态分析外，也可以分析高频电路的瞬态响应。此外，高频 SPICE 也提供瞬态噪声分析的功能，可以用来仿真电路的瞬态噪声，如振荡器或锁相环的抖动。

卷积分析方法是架构在 SPICE 高频仿真器上的高级时域分析方法，可以更加准确地用时域方法分析与频率相关的元件，如 S 参数定义的元件、传输线、微带线等。

【线性分析】线性分析是频域电路仿真分析方法，可以将线性或非线性的射频与微波电路做线性分析。当线性分析时，软件首先针对电路中每个元件计算所需的线性参数，如 S、Z、Y 和 H 参数，电路阻抗，噪声，反射系数，稳定系数，增益或损耗等（若为非线性元件，则计算其工作点等线性参数），再进行整个电路的分析、仿真。

【谐波平衡分析】谐波平衡分析提供频域、稳态、大信号的电路分析仿真方法，可以用来分析具有多频输入信号的非线性电路，得到非线性的电路响应，如噪声、功率压缩点、谐波失真等。与时域 SPICE 仿真分析相比，谐波平衡对非线性电路，可以提供更快速有效的分析方法。

谐波平衡分析方法的出现弥补了 SPICE 的瞬态响应分析和线性 S 参数分析对具有多频输入信号的非线性电路仿真上的不足。尤其在现今的高频通信系统中，大多包含了混频电路结构，使谐波平衡分析方法更加频繁，也越趋重要。

另外，针对高度非线性电路，如锁相环中的分频器，ADS 也提供了瞬态辅助谐波平衡的仿真方法，在电路分析时先执行瞬态分析，并将此瞬态分析的结果作为谐波平衡分析时的初始条件进行电路仿真，此种方法可以有效地解决在高度非线性的电路分析时发生不收敛的情况。

【电路包络分析】电路包络分析包含了时域与频域的分析方法，用于包含调频信号的电路或通信系统中。电路包络分析借鉴了 SPICE 与谐波平衡两种仿真方法的优点，将较低频的调频信号用时域 SPICE 仿真方法来分析，而较高频的载波信号用频域的谐波平衡仿真方法进行分析。

【射频系统分析】射频系统分析方法给用户提供模拟评估系统特性，其中系统的电路模型除可以使用行为级模型外，也可以使用元件电路模型进行响应验证。射频系统仿真分析包含了上述的线性分析、谐波平衡分析和电路包络分析，分别用来验证射频系统的无源元件与线性系统模型特性、非线性系统模型特性、具有数字调频信号的系统特性。

【托勒密分析】托勒密分析方法可以同时仿真包含数字信号、模拟和高频信号的混合模式系统。ADS 分别提供了数字元件模型（如 FIR 滤波器、IIR 滤波器、AND 逻辑门、OR 逻辑门等）、通信系统元件模型（如 QAM 调频解调器、Raised Cosine 滤波器等）及模拟高频元件模型（如 IQ 编码器、切比雪夫滤波器、混频器等），在设计中可直接使用。

【电磁仿真分析】ADS 软件提供了 3D 平面电磁仿真分析功能——Momentum，可以用来仿真微带线、带状线、共面波导等元件的电磁特性，天线的辐射特性，以及电路板上的寄生、耦合效应。分析得到的 S 参数结果可直接用于谐波平衡和电路包络等电路分析中，对电路进行设计与验证。在 Momentum 电磁分析中提供 Momentum 微波模式和 Momentum 射频模式两种模式，用户可以根据电路的工作频段和尺寸选择使用。

3．ADS 辅助设计功能

ADS 软件除了上述的仿真分析功能外，还包含其他辅助设计功能来增加使用的方便性，同时提高电路设计效率。ADS 所提供的辅助设计功能简介如下。

【设计指南】设计指南说明了示范电路设计的设计流程，用户可以经由这些范例，利用 ADS 软件高效地设计电路。

目前，ADS 所提供的设计指南包括：Amplifier 设计指南、Bluetooth 设计指南、CDMA2000 设计指南、Filter 设计指南、Mixer 设计指南、Oscillator 设计指南、Passive Circuits 设计指南、PLL 设计指南、RF 系统设计指南、TD-SCDMA 设计指南、Ultra-Wideband 设计指南等。除了使用 ADS 软件自带的设计指南外，用户也可以通过软件中的 DesignGuide Developer Studio 建立自己的设计指南。

【智能仿真向导】智能仿真向导提供“step-by-step”的设定界面供设计人员进行电路分析与设计，用户可以由图形化界面设定所需验证的电路响应。

ADS 提供的智能仿真向导包括：元件特性（Device Characterization）、放大器（Amplifier）、混频器（Mixer）和线性电路（Linear Circuit）。

【仿真与结果显示模板】为了增加仿真分析的方便性，ADS 软件提供了仿真模板功能，使用户可以将经常重复使用的仿真设定（如仿真控制器、电压电流源、变量参数设定等）制定成一个模板，直接使用，避免了重复设定所需的时间和步骤。结果显示模板也具有相同的功能，用户可以将经常使用的绘图或列表格式制作成模板以减少重复设定所需的时间。除了用户自行建立模板外，ADS 软件也提供了标准的仿真与结果显示模板供用户选择使用。

【电子笔记本】电子笔记本可以使用户将所设计的电路与仿真结果，加入文字叙述，制成一份网页式的报告。电子笔记本制成的报告，无须执行 ADS 软件即可在浏览器上浏览。

4．ADS 与其他 EDA 软件和测试设备间的连接

由于现今复杂庞大的电路设计，每个 EDA 软件在整个系统设计中均扮演着螺丝钉的角色，因此软件与软件之间、软件与硬件之间、软件与元件厂商之间的沟通与连接也成为设计中不容忽视的一环。ADS 软件与其他设计验证软件、硬件的连接简介如下。

【SPICE 电路转换器】SPICE 电路转换器可以将 Cadence、Spectre、PSPICE、HSPICE 及 Berkeley SPICE 产生的电路转换成 ADS 格式的电路进行仿真分析。另外，也可以将 ADS 产生的电路转换成 SPICE 格式的电路，做布局与电路结构检查与布局寄生抽取等验证。

【电路与布局文件格式转换器】电路与布局文件格式转换器提供用户与其他 EDA 软件连接沟通的桥梁，由此转换器可以将不同 EDA 软件所产生的文件，转换成 ADS 可以使用的文件格式。

【布局转换器】布局转换器可以将其他 CAD 或 EDA 软件所产生的布局文件导入 ADS 软件编辑使用，可以转换的格式包括 IDES、GDSII、DXF 和 Gerber 等。

【SPICE 模型产生器】SPICE 模型产生器可以将频域分析得到的或是测量仪器得到的 S 参数转换为 SPICE 可以使用的格式，以弥补 SPICE 仿真软件无法使用测量或仿真所得到的 S 参数资料的不足。

【设计工具箱】对于 IC 设计来说，EDA 软件除了需要提供准确快速的仿真方法外，与半导体厂商的元件模型间的连接更是不可或缺，设计工具箱扮演了 ADS 软件与厂商元件模

型间沟通的重要角色。ADS 软件可以利用设计工具箱将半导体厂商的元件模型读入，供用户进行电路的设计、仿真与分析。

【仪器伺服器】仪器伺服器提供了 ADS 软件与测量仪器连接的功能，用户可以通过仪器伺服器将网络分析仪测量得到的资料或 SnP 格式的文件导入 ADS 软件中进行仿真分析，也可以将软件仿真所得的结果输出到仪器设备（如信号发生器），作为待测元件的测试信号。

5．ADS 主要仿真器介绍

ADS 集成多种仿真软件的优点，仿真手段丰富，因其强大的功能，很快成为全球内业界流行的 EDA 设计工具。下面详细介绍 ADS 在射频、模拟电路设计中常用的仿真器及其功能。

【直流仿真】直流仿真是所有仿真的基础，它可执行电路的拓扑检查以及直流工作点扫描和分析。

【交流仿真】交流仿真能获取小信号传输参数，如电压增益、电流增益、线性噪声电压、电流。在设计无源电路和小信号有源电路如低噪声放大器时，此仿真器十分有用。

【S 参数仿真】微波器件在小信号时，被认为工作在线性状态，是一个线性网络；在大信号工作时，被认为工作在非线性状态，是一个非线性网络。通常采用 S 参数分析线性网络，谐波平衡法分析非线性网络。S 参数是入射波和反射波建立的一组线性关系，在微波电路中通常用来分析和描述网络的输入特性。S 参数中的 S11 和 S22 反映了输入、输出端的驻波特性，S21 反映了电路的幅频和相频特性以及群时延特性，S12 反映电路的隔离性能。

S 参数仿真时将电路视为一个四端口网络，在工作点上将电路线性化，执行线性小信号分析，通过其特定的算法，分析出各种参数值。因此，S 参数仿真可以分析线性 S 参数、线性噪声参数、传输阻抗（Z_{ij}）以及传输导纳（Y_{ij}）。

【谐波平衡仿真】谐波平衡仿真着眼于信号频域特征，擅长处理对非线性电路的分析。如果调制的周期信号可以用简单的几个单载波及其谐波表示出来，或者说如果傅里叶级数展开式很简单的话，谐波平衡仿真是一个有效的分析工具。但是，如果分析的是诸如 CDMA 等信号，不具备简单的周期信号的特点，那么，谐波平衡仿真就不能胜任。

一般网络（系统）由线性子网络和非线性子网络组成。线性子网络的特性可用频域代数方程来描述，而非线性子网络则由时域的非线性方程来描述。平衡时，经傅里叶变换成时域的线性子网络端口电压和电流应满足非线性子网络端口的电压和电流。同样，经傅里叶变换成频域的非线性子网络端口电压和电流应满足线性子网络端口的电压和电流。因此，设定一个最大的谐波数，建立一个线性子网络端口电压（电流）和非线性子网络端口的电压（电流）的误差函数，通过迭代，实现稳态的线性子网络和非线性子网络的谐波平衡。采用谐波平衡仿真器可以仿真噪声系数、饱和电平、三阶交调、本振泄漏、镜像抑制、中频抑制、组合干扰等参数。一般而言，谐波平衡仿真设计射频放大器、混频器、振荡器时十分有用。当设计大规模 RFIC 或 RF/IF 子系统时，由于存在大量的谐波和交调成分，谐波平衡仿真必不可少。

【大信号 S 参数仿真】大信号 S 参数仿真是谐波平衡仿真的一种，不同的是前者执行大信号 S 参数分析，因此，在设计功放时十分有用。后者一般只用于小信号 S 参数分析。

【增益压缩仿真】增益压缩仿真用于寻找用户自定义的增益压缩点，它将理想的线性功率曲线与实际的功率曲线的偏离点相比较。在设计射频器件时可以很方便地找出 1dB、3dB 压缩点。

【电路包络仿真】电路包络仿真是近年来通信系统的一项标志性技术。其特点是对于任何类型的高频调制信号，均可分解为时域和频域两部分进行处理。在时域上，对相对低频的调制信息进行直接采样处理，而对相对高频的载波成分，则采用类似的谐波平衡仿真的方法，在频域进行处理。这样的结合使仿真效率和速度都得到质的飞跃。因此，电路包络仿真是目前进行数模混合仿真和数字微波系统仿真最有效率的工具之一。

电路包络仿真多用在涉及调制解调以及混合调制信号的电路和系统中。在通信中，如 CDMA、GSM、QPSK、QAM 等，在雷达中，如 LFM 波、非线性调频波、脉冲编码等均可用电路包络仿真进行仿真。

【瞬态仿真】瞬态仿真是传统的 SPICE 软件的代表。SPICE 软件可以说是所有电路仿真软件的鼻祖。它采用最原始的算法，即直接在时域对电流、电压列节点方程，采用“一刀切”的方式，能够对所有的模拟、数字电路进行仿真。但是对于高频信号很难用 SPICE 进行仿真，因为根据 Nyquist 采样定理，仿真时直接采样，软件必须能够对射频载波进行至少 2 倍频率以上的采样和处理，才能够准确、真实地反映系统的实际情况，即时域上的相位、幅度信息，以及频域上的频率特性等。以处理一个 8GHz 的射频载波为例，要分析 1s 的信号，CPU 至少要处理 2.4×10^{10} 点的数据。因此，在很多情况下，很难用瞬态仿真对高频系统仿真。

以上是 ADS 主要仿真器的功能描述。由于每个仿真器只能完成特定指标的仿真，因此在仿真完整电路时，必须调用多个仿真器才能完成所有指标的仿真。电路在仿真时，一次只能执行一个仿真器的仿真，在执行此仿真时，别的仿真器应处于非激活状态。对于微波/射频电路和系统设计，最常用的是 S 参数仿真、电路包络仿真和谐波平衡仿真等。

表 1-1 列出了使用 ADS 仿真工具设计常用的微波/射频电路所要用到的仿真器。

表 1-1　典型微波/射频电路设计所需 ADS 仿真器

射频器件或模块	常 用 仿 真	仿 真 参 数
滤波器	S-parameter	S21、S12、S11、S22
混频器	DC	工作点状态
	AC	增益、噪声电压、电流
	Harmonic Balance	IP3、IF
	Transient	瞬态响应
	Envelope	包络特性
功放	S-parameter	S 参数
	Harmonic Balance	各种谐波和交调
	LSSP	大信号 S 参数
	XDB	P-1
	Transient	瞬态响应
	Envelope	包络特性
接收机	AC	交流特性
	Harmonic Balance	谐波和交调
	Envelope	复杂波形如 LFM

续表

射频器件或模块	常 用 仿 真	仿 真 参 数
振荡器	DC	节点电压、电流
	S-parameter	S 参数
	Harmonic Balance	谐波和交调
	Envelope	包络特性
锁相环	Envelope	相噪

1.2　ADS2012 安装过程

ADS2012 的安装过程与其他 Windows 应用程序类似，下面介绍该软件的具体安装步骤。

（1）从安捷伦官方网站下载 ADS2012 软件，打开 ADS2012 的安装包，双击“setup.exe”文件，弹出如图 1-1 所示的解压安装文件对话框。



图 1-1　解压安装文件对话框

（2）解压文件结束后，弹出安装语言选择对话框，如图 1-2 所示，选择 English。

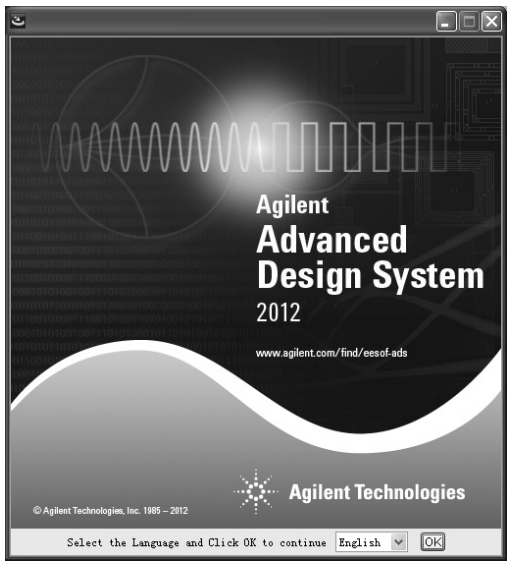


图 1-2　安装语言选择对话框

（3）单击安装向导对话框中的OK按钮，弹出新的安装向导对话框，如图 1-3 所示。

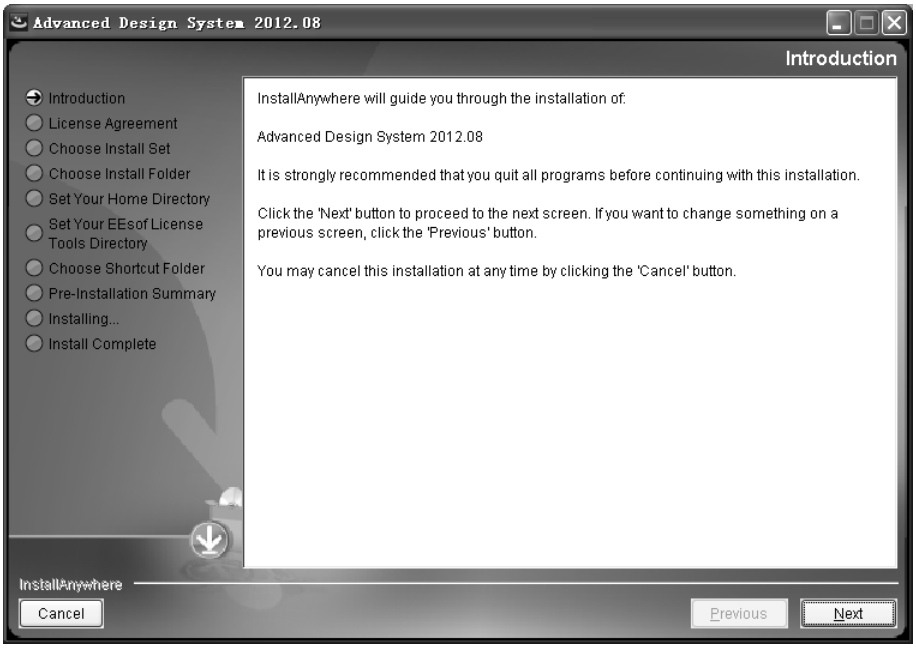


图 1-3　安装引导对话框

（4）单击Next按钮，弹出安装许可对话框，如图 1-4 所示，选择接受许可。

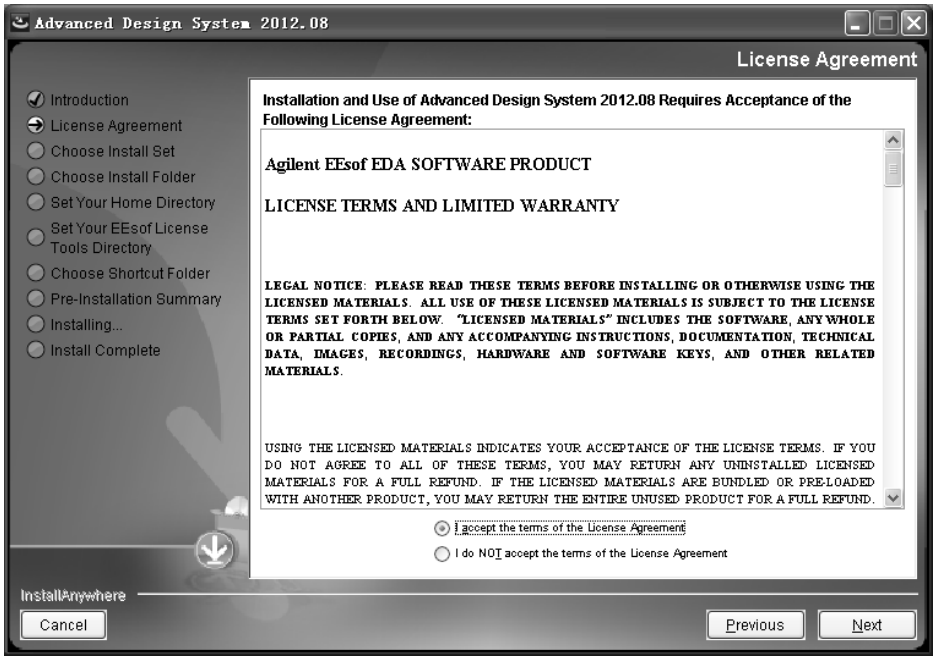


图 1-4　安装许可对话框

（5）单击Next按钮，弹出“Choose Install Set”对话框，如图 1-5 所示。具有“Complete”和“Custom”两种安装模式。单击“Complete”，选择“Complete”模式。

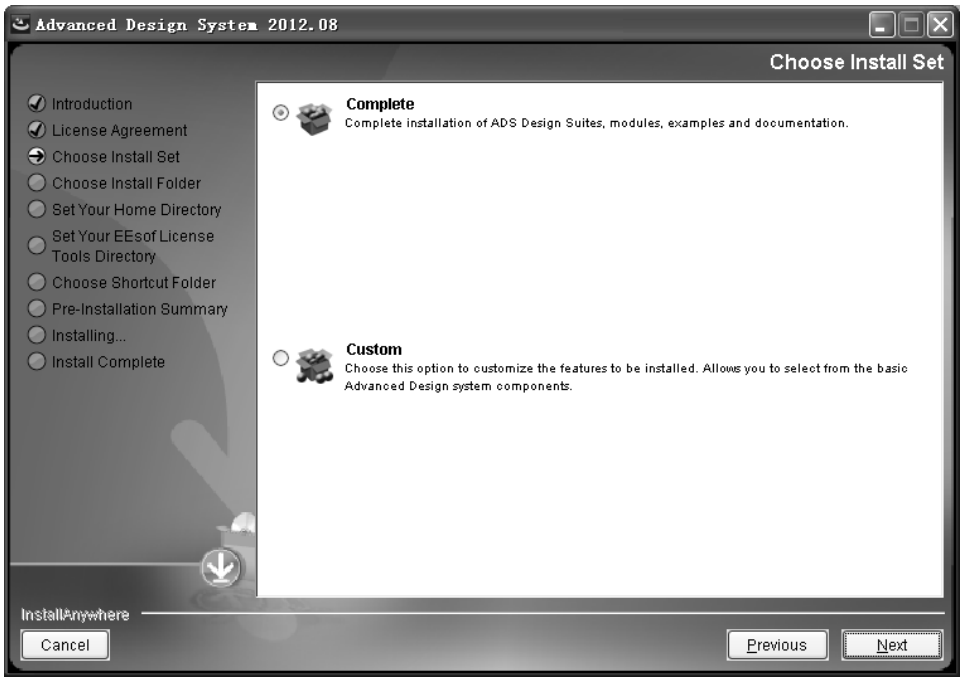


图 1-5 “Choose Install Set”对话框

（6）单击 Next 按钮，弹出“Choose Install Folder”对话框，如图 1-6 所示。默认路径是 c:\Agilent\ADS2012_08，该软件安装完成后占用空间约为 4.29GB，根据个人计算机的情况选择合理路径安装，本教材选择路径为 d:\Agilent\ADS2012_08。

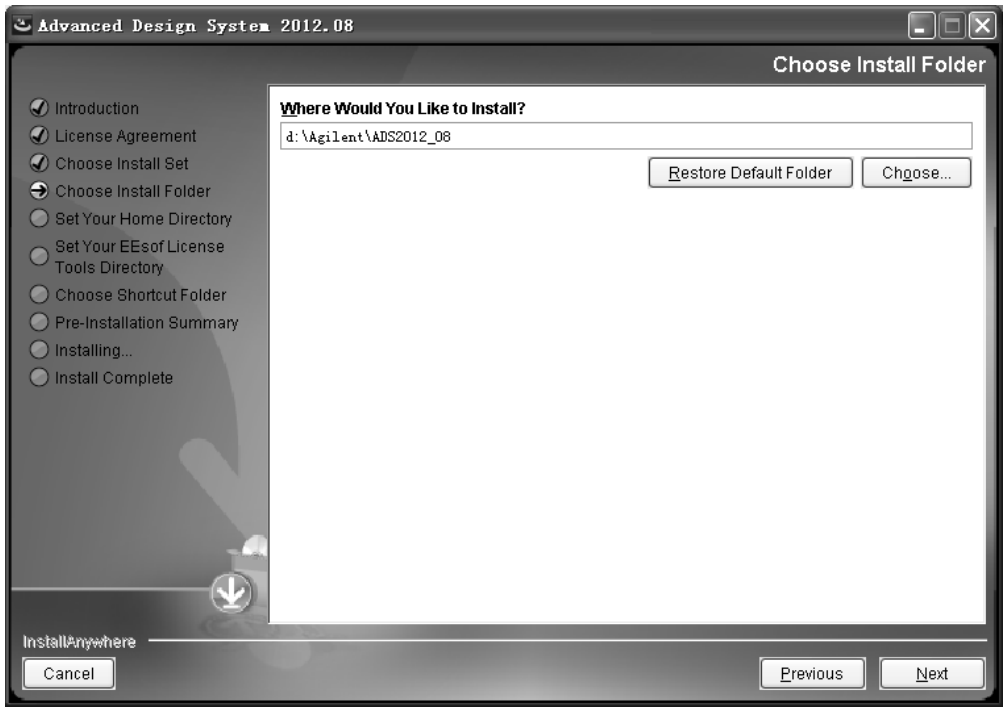


图 1-6 “Choose Install Folder”对话框

（7）单击 Next 按钮，弹出“Set Your Home Directory”对话框，如图 1-7 所示。默认路径是 c:\users\default，这里可以修改文件保存路径，如设置为 d:\users\default。

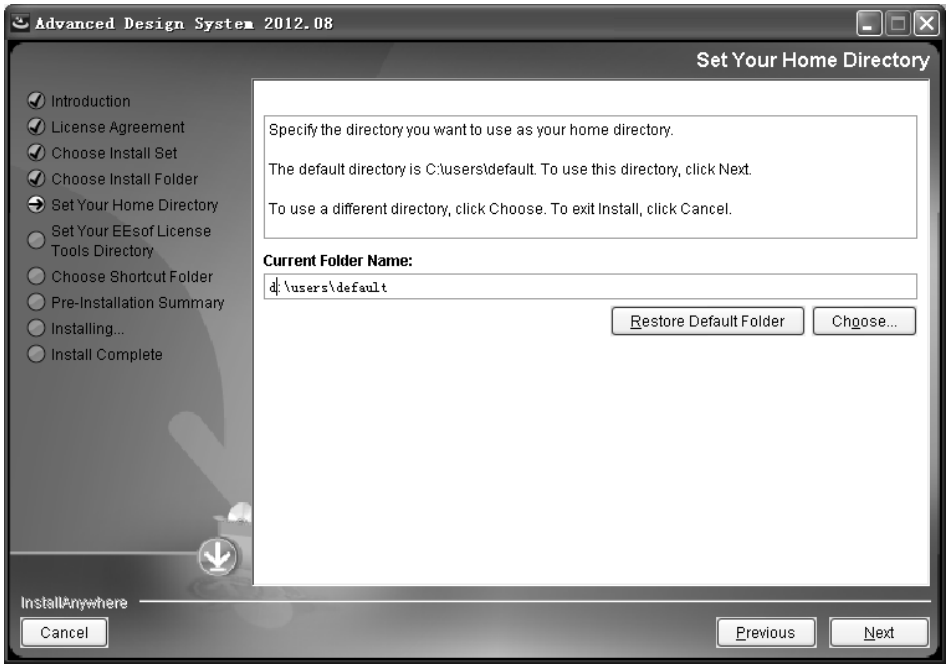


图 1-7 “Set Your Home Directory”对话框

（8）单击 Next 按钮，弹出“Set Your EEsof License Tools Directory”对话框，如图 1-8 所示。

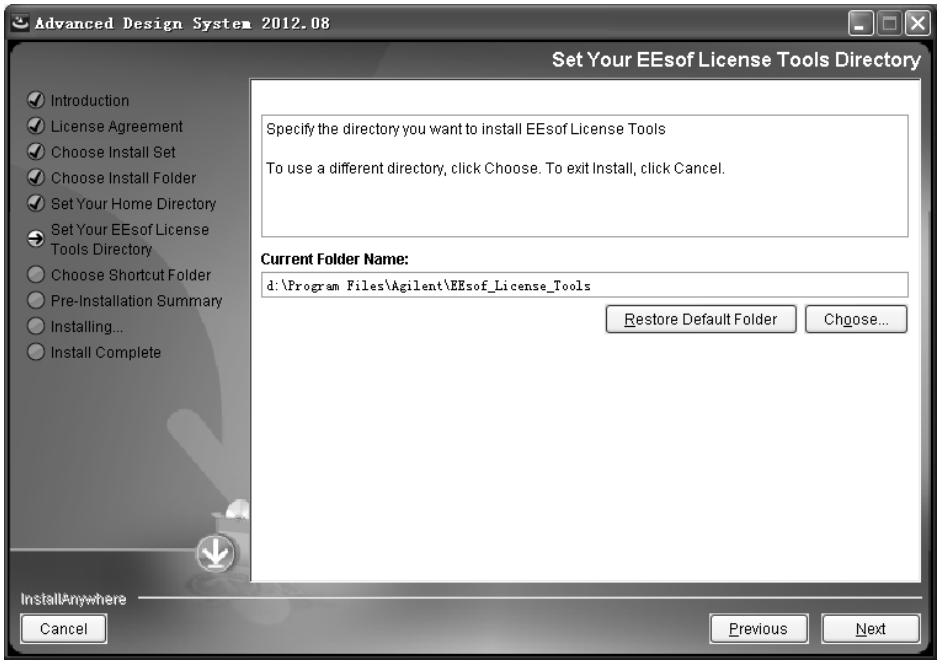


图 1-8 “Set Your EEsof License Tools Directory”对话框

（9）单击 Next 按钮，弹出“Choose Shortcut Folder”对话框，软件开始安装，如图 1–9 所示。

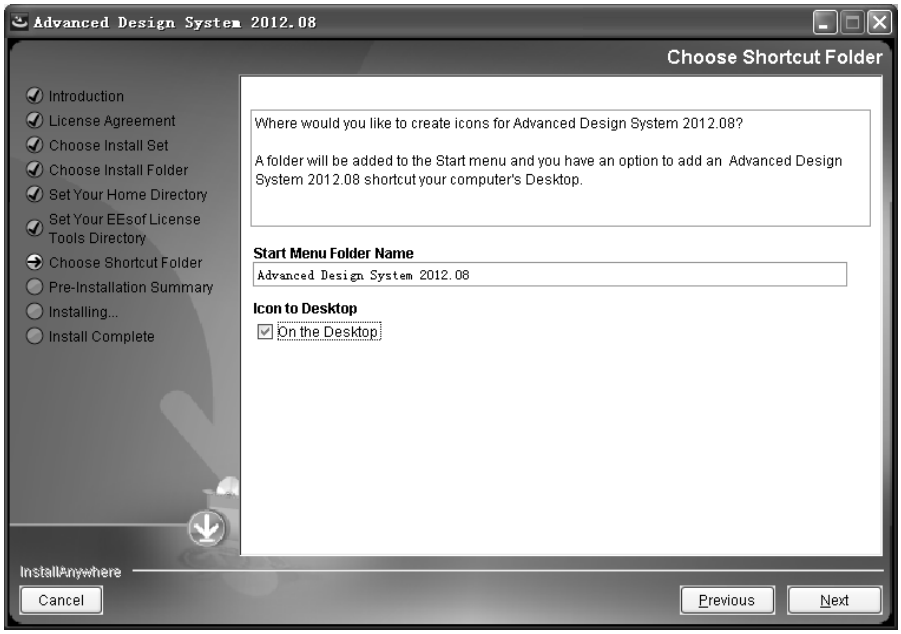


图 1–9 “Choose Shortcut Folder”对话框

（10）单击 Next 按钮，弹出“Pre-Installation Summary”对话框，如图 1–10 所示。



图 1–10 “Pre-Installation Summary”对话框

（11）单击 Install 按钮，软件开始安装，安装进度对话框如图 1–11 所示，大约需要 30min。

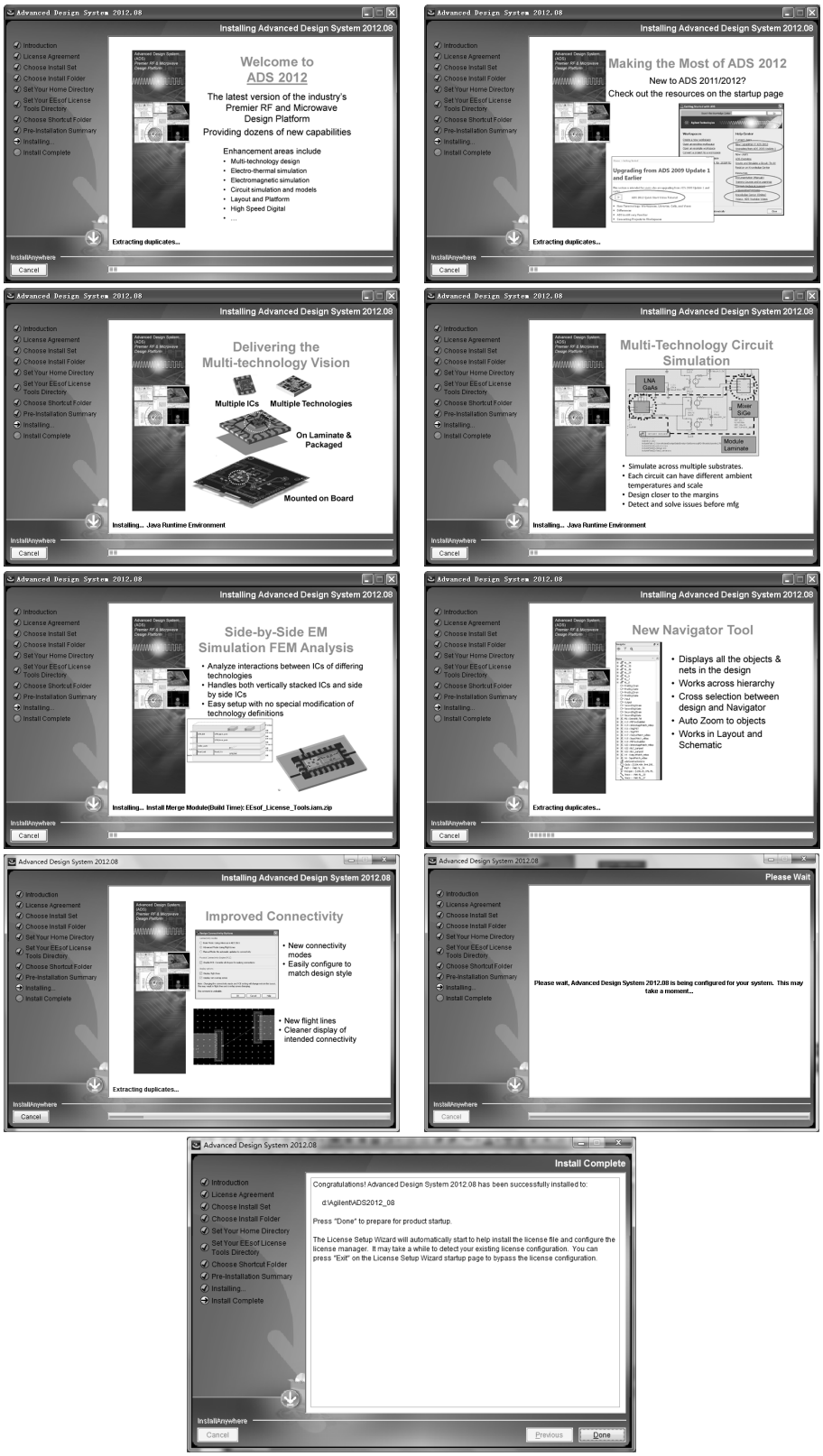


图 1-11　安装进度对话框

（12）最后软件安装完成，单击 Done 按钮，会弹出安装许可，指定安装路径即可，如图 1-12 所示。

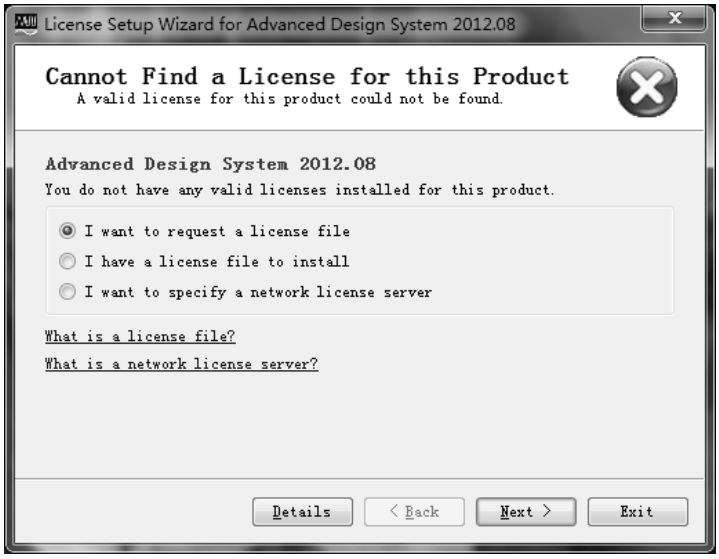


图 1-12　安装许可

1.3　ADS2012 操作窗口介绍

启动 ADS2012，单击桌面的快捷方式，或者“开始”菜单→Advanced Design System 2012.08→Advanced Design System 2012.08（32-bit Simulations），弹出对话框，如图 1-13 所示。选择 ADS Design Environment，单击 OK 按钮。弹出“Getting Started with ADS”对话框，如图 1-14 所示，该对话框可以根据实际需要快速地选择要进行的下一步工作。这里选择单击 Close 按钮，弹出 ADS 的主窗口。

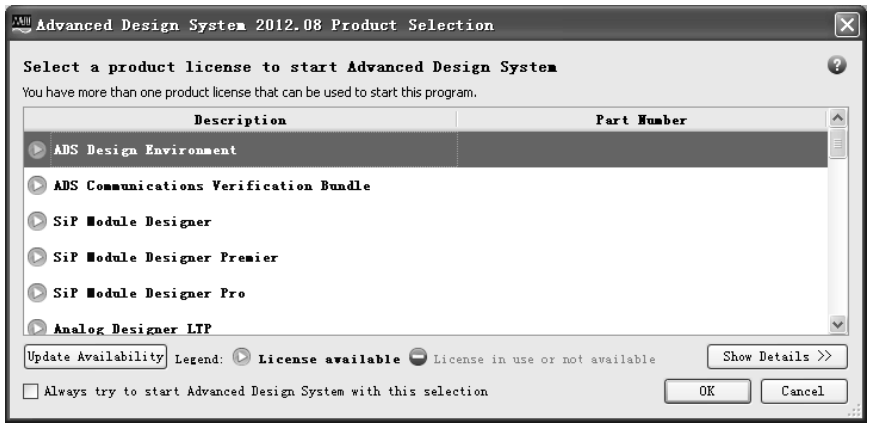


图 1-13　ADS 启动界面

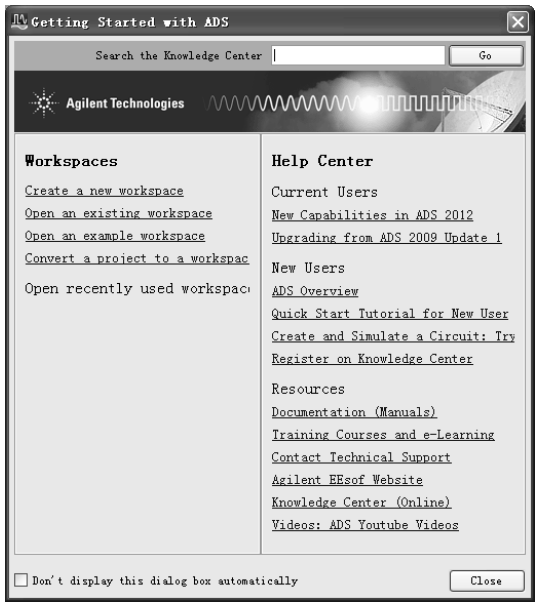


图 1-14 “Getting Started with ADS”对话框

ADS 操作窗口主要包括：主窗口、设计环境视窗（原理图设计视窗、DSP/通信系统设计视窗、布线/电磁模拟视窗）、仿真状态窗口、数据显示窗口等。

1．主窗口

ADS 软件主窗口主要用于创建/打开工程、文件管理、工程管理等。启动 ADS 软件，弹出 ADS 主窗口，如图 1-15 所示，主要包含菜单栏、工具栏、文件浏览区等。

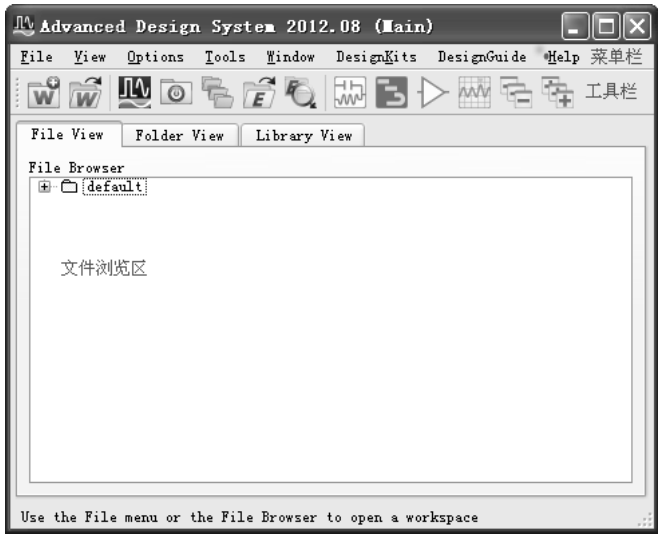


图 1-15 ADS 主窗口

1）菜单栏 菜单栏包含“File”、“View”、“Options”、“Tools”、“Window”、“DesignKits”、“DesignGuide”和“Help”八个下拉菜单。

【File】主要包括工程和电路图建立、打开、保存等功能，具体选项如图 1-16 所示。

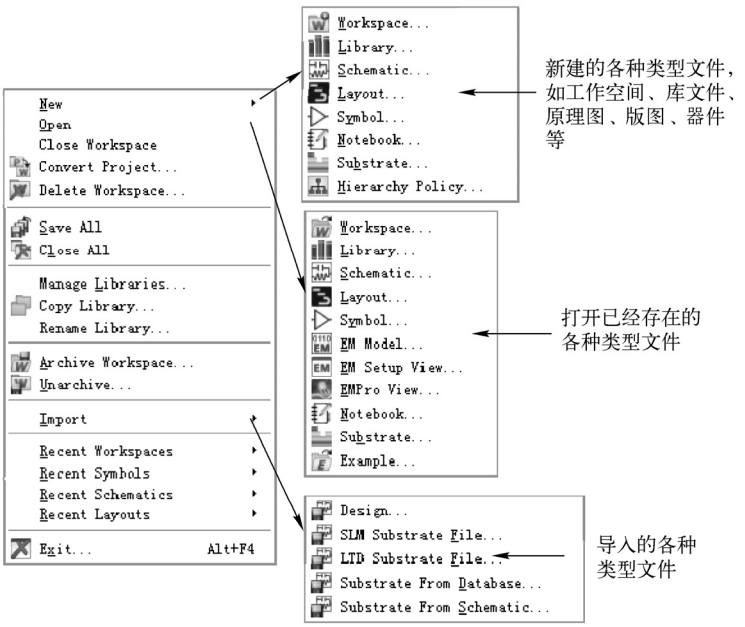


图 1-16 “File”子菜单

【View】主要包括主窗口外观管理和内容显示等功能，具体选项如图 1-17 所示。

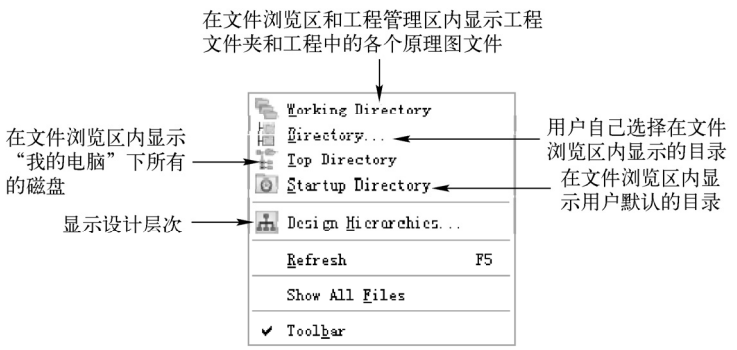


图 1-17 “View”子菜单

【Options】主要用于完成全局参数的设置，如图 1-18 所示。

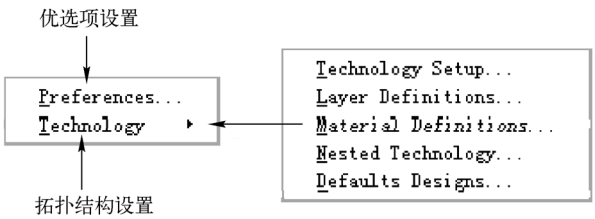


图 1-18 “Options”子菜单

【Tools】主要是对 ADS 软件系统进行各种设置和管理，各选项如图 1-19 所示。

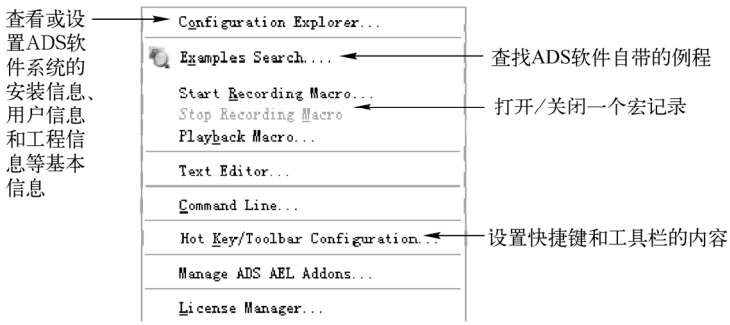


图 1-19 “Tools”子菜单

【Window】主要是对 ADS 各窗口进行管理，各选项如图 1-20 所示。

【DesignKits】主要是对设计包进行管理，包括安装、删除等，各选项如图 1-21 所示。

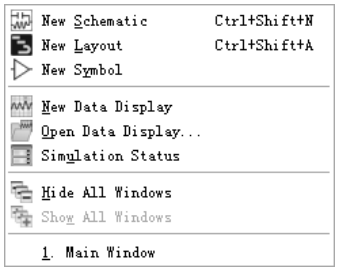


图 1-20 “Window”子菜单



图 1-21 “DesignKits”子菜单

【DesignGuide】主要是给用户提供设计向导，同时用户也可以自制设计向导，各选项如图 1-22 所示。

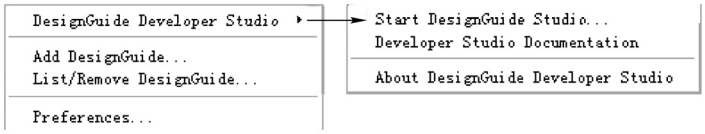


图 1-22 “DesignGuide”子菜单

【Help】主要是针对使用 ADS 软件的用户提供各种帮助，并显示文档和版本信息等内容，各选项如图 1-23 所示。

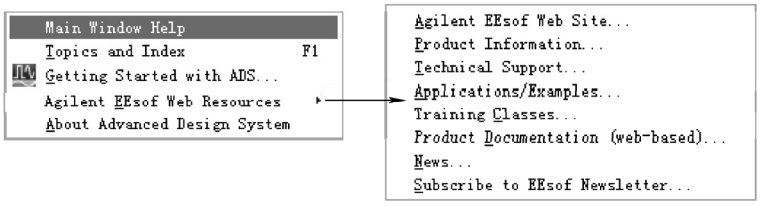


图 1-23 “Help”子菜单

2）工具栏 ADS 工具栏提供了各种快捷按钮，可以方便地进行相关操作。工具栏位于菜单栏下面，各快捷按钮具体实现的功能如图 1-24 所示。当鼠标停留在这些快捷按钮上时，会出现英文功能的提示。



图 1-24　工具栏快捷按钮功能

用户可以通过【Tools】→【Hot Key/Toolbar Configuration】→【Toolbar】菜单增加或减少快捷工具栏的按钮。

3）文件浏览区　文件浏览区不但可以浏览计算机中的文件夹，而且可以打开一个工程项目，如系统自带的工程，通过“File View”、“Folder View”和“Library View”三个选项卡，查看不同的信息。具体含义如图 1-25 所示。

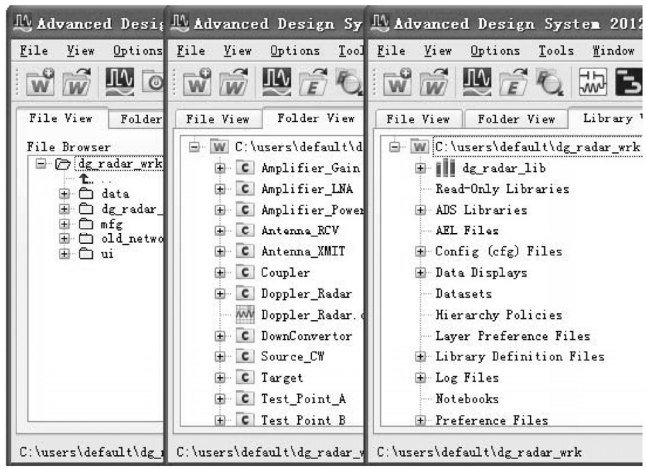


图 1-25　文件浏览区

2．原理图设计窗口

ADS 原理图设计窗口为用户提供原理图设计环境，也是用户进行电路原理图仿真的窗口，如图 1-26 所示，主要包含标题栏、菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板、历史元件、提示信息和绘图区。

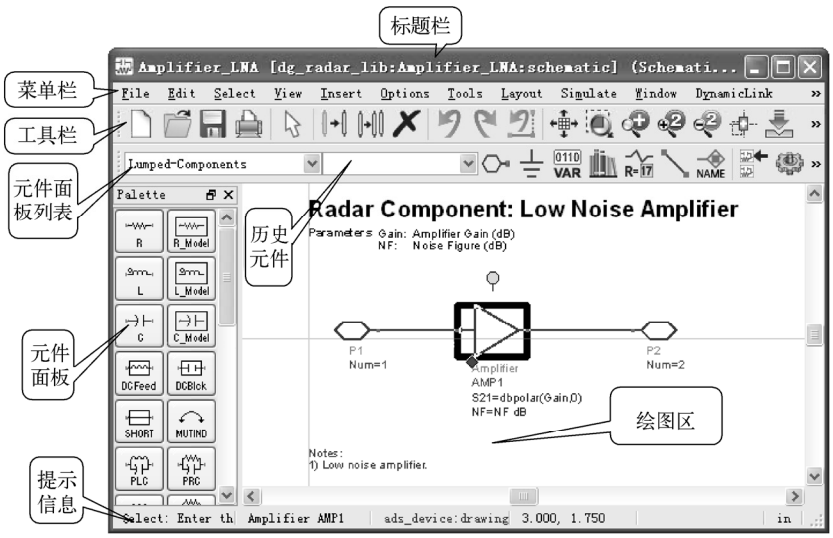


图 1-26　ADS 原理图设计窗口

1）菜单栏 菜单栏包含“File”、“Edit”、“Select”、“View”、“Insert”、“Options”、“Tools”、“Layout”、“Simulate”、“Window”、“DynamicLink”、“DesignGuide”、“Help”13个下拉菜单。这些下拉菜单与前面介绍的菜单有很多相似之处，每个菜单的详细内容不再赘述，重要的功能菜单在后面章节应用中会重点说明。

【File】：包含原理图文件的创建、打开、关闭、保存、打印等功能。

【Edit】：包含编辑的基本操作，如复制、粘贴等。

【Select】：包含选定或取消选定某些元件或区域的功能。

【View】：包含设置原理图视图的功能，如放大、缩小等。

【Insert】：包含构成原理图中各种要素，如器件、导线、端口等。

【Options】：包含原理图全局设置等各种设置窗口。

【Tools】：包含各种功能的设置工具，如传输线计算、Smith 圆图、阻抗匹配等。

【Layout】：用于由原理图生成版图的操作和各种设置。

【Simulate】：包含开始仿真、仿真设置、停止仿真、调谐的设置等。

【Window】：用于创建或关闭窗口。

【DynamicLink】：原理图动态链接等功能。

【DesignGuide】：设计向导。

【Help】：帮助文件。

2）工具栏 工具栏包括一些常用的按钮，如打开原理图文件、保存、器件旋转、删除等，下面重点介绍几个常用的按钮。

：移动元件
：复制并移动元件
：取消最顶端条目
：查看绘图区中的所有元件
：绘图区域放大到选定区域
：调整指定点到绘图区中央
：进入选定电路子电路
：从子电路返回顶层设计
：元件的增量旋转
：元件相对于 x 轴镜像
：元件相对于 y 轴镜像
：使元件无效并短路
：使元件无效
：智能仿真向导
：原理图中插入端口
：原理图中插入变量
：显示元件库列表
：编辑元件参数
：接地
：器件连线工具
：插入线或元件引脚标签
：执行仿真
：调谐元件参数
：新建数据显示窗口
：执行数据文件工具

3）元件面板列表 元件面板列表中将原理图设计过程中可能用到的元件和控件分类进行列表式管理，使用户可以方便地按类型选择元件。

【Lumped-Components】集总参数器件面板，包含电阻、电容、电感等集总参数器件。

【Lumped-With Artwork】带有封装模型的集总参数器件面板。

【Sources-Controlled】受控源元件面板，包含 VCCS、VCVS 等。

【Sources-Freq Domain】频域源模型元件面板，包含频域电压源、频域功率源等。

【Sources-Modulated】调制源模型元件面板，含有调制信号源模型，包含 GSM、

CDMA 等。

【Sources-Modulated-DSP-Based】基于 DSP 的调制信号源元件面板，包含 TD-SCDMA、WLAN.11a/b 等。

【Sources-Noise】噪声源元件面板，包含噪声电压源、噪声电流源。

【Sources-Time Domain】时域源模型元件面板，包含时域电压源、时域功率源等。

【Simulation-DC】直流仿真元件面板，包含直流仿真所需要的各种控件。

【Simulation-AC】交流仿真元件面板，包含交流仿真所需要的各种控件。

【Simulation-S_Param】S 参数仿真元件面板，包含 S 参数仿真所需要的各种控件。

【Simulation-HB】谐波平衡法仿真元件面板，包含谐波平衡仿真所需要的各种控件。

【Simulation-LSSP】大信号 S 参数仿真元件面板，包含大信号 S 参数仿真所需要的各种控件。

【Simulation-XDB】增益压缩仿真元件面板，包含增益压缩仿真所需要的各种控件。

【Simulation-Envelope】包络仿真元件面板，包含包络仿真所需要的各种控件。

【Simulation-Transient】瞬态仿真元件面板，包含瞬态仿真所需要的各种控件。

【Simulation-Batch】批处理仿真元件面板。

【Simulation-ChannelSim】信道仿真元件面板。

【Simulation-Instrument】仿真工具元件面板，包含仿真所需要的各种工具，如单位脉冲响应工具。

【Simulation-Budget】预算仿真元件面板，包含预算仿真所需要的各种控件。

【Simulation-Sequencing】序列仿真元件面板，包含序列仿真所需要的各种控件。

【Optim/Stat/Yield/DOE】优化/统计/良品率/专用设备控件元件面板，可以优化设计。

【Probe Components】显示元件面板，包含各种显示设备模型，如电压表、电流表。

【Data Items】数据管理元件面板，面板中元件主要功能是对 ADS 中的数据条目进行管理。

【Tlines-Ideal】理想传输线元件面板，包含各种理想传输线模型。

【Tlines-Microstrip】微带传输线元件面板，包含各种形状和特性的微带传输线。

【Tlines-Printed Circuit Board】PCB 传输线元件面板，包含各种形状和特性的印制电路传输线。

【Tlines-Stripline】带状传输线元件面板，包含各种形状和特性的带状传输线。

【Tlines-Suspended Substrate】悬浮基底传输线元件面板，包含各种悬浮基底传输线。

【Tlines-Fineline】鳍线传输线元件面板，包含各种鳍线传输线。

【Tlines-Waveguide】波导元件面板，包含各种波导元件。

【Tlines-Multilayer】多层传输线元件面板，包含多层传输线。

【Passive-RF Circuit】无源射频电路元件面板，包含各种无源电路模型。

【Passive-Broadband Spice Models】宽带 SPICE 模型元件模板，包含各种宽带 SPICE 模型。

【Eqn Based-Linear】基于方程的线性网络元件面板，包含各种线性网络模型，这些网络模型参数都以线性方程给出。

【Eqn Based-Nonlinear】基于方程的非线性网络元件面板，包含各种非线性网络模型，这些网络模型参数以非线性方程给出。

【Devices-Linear】线性元件面板，包含线性化二极管、三极管等一些常用线性元件。

【Devices-BJT】三极管元件面板。

【Devices-Diodes】二极管元件面板。

【Devices-GaAs】砷化镓元件面板。

【Devices-JFET】结型场效应管元件面板。

【Devices-MOS】MOS 元件面板。

【Signal Integrity-IBIS】IBIS 元件面板，主要用于信号完整性分析。

【Signal Integrity-Verification】信号完整性验证面板，提供信号完整性验证分析。

【Filters-Bandpass】带通滤波器元件面板。

【Filters-Bandstop】带阻滤波器元件面板。

【Filters-Highpass】高通滤波器元件面板。

【Filters-Lowpass】低通滤波器元件面板。

【System-Mod/Demod】调制解调器元件面板。

【System-PLL Components】锁相环元件面板。

【System-Passive】系统级无源元件面板。

【System-Switch & Algorithmic】开关和运算元件面板。

【System-Amps & Mixers】放大器和混频器面板。

【System-Data Models】基于数据文件的模型面板。

【Tx/Rx Subsysrems】收发子系统模型面板。

【Drawing Formats】画图格式面板，包含 A~E 几种图纸框模板。

【Filter DG-All】滤波器设计向导面板，面板中元件是用于滤波器设计向导的各种滤波器器件模型。

【Passive Circuit DG-RLC】RLC 电路设计向导模板，包含各种电阻、电容和电感的结构模型，用于帮助用户进行最底层设计。

【Passive Circuit DG-Microstrip】微带传输线设计向导模板。

【Passive Circuit DG-Microstrip Circuits】微带传输线电路设计向导模板。

【Passive Circuit DG-Stripline】带状传输线设计向导模板。

【Passive Circuit DG-Stripline Circuits】带状传输线电路设计向导模板。

【Smith Chart Matching】Smith 圆图匹配面板。

【Transistor Bias】晶体管偏置电路面板。

【Impedance Matching】阻抗匹配元件面板。

3．仿真状态窗口

仿真状态窗口如图 1–27 所示，用于显示工程在仿真时出现的信息，根据不同的仿真类型，显示的信息有仿真时的频率、消耗时间等。如果设计有错误，会在“Simulation/Synthesis Messages”窗口下显示错误信息，修改编译后仿真正确运行。

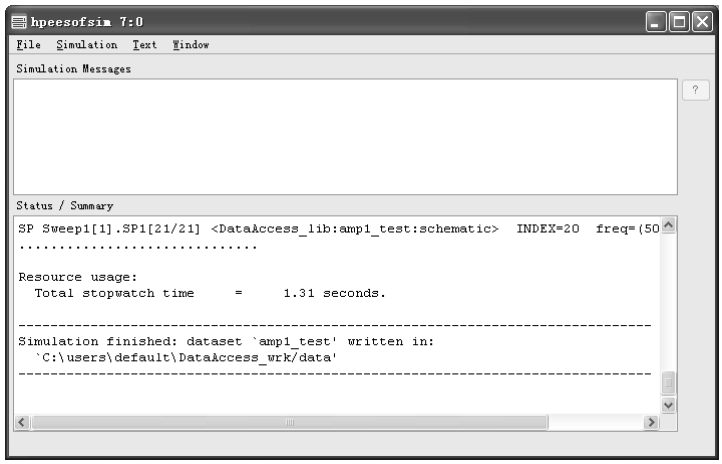


图 1-27　仿真状态窗口

4．数据显示窗口

当仿真正确运行后，可以通过数据显示窗口，对仿真数据或曲线进行进一步分析，如图 1-28 所示。

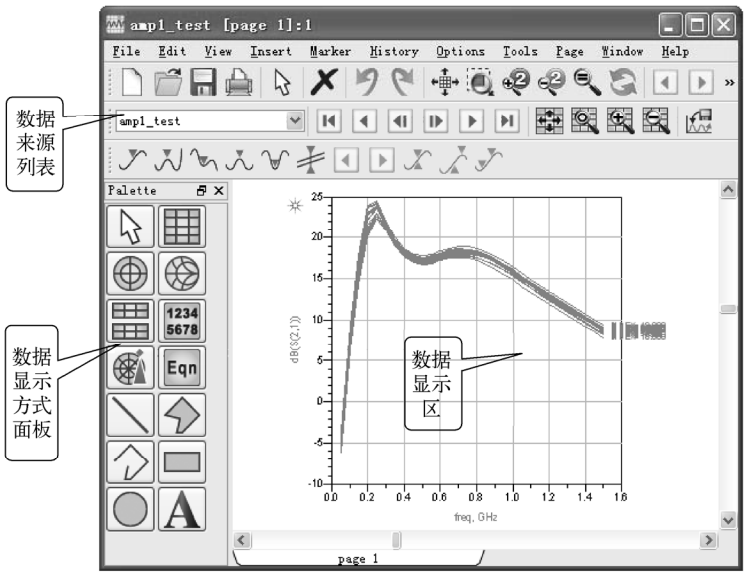


图 1-28　数据显示窗口

ADS 的数据显示和分析方式灵活，功能强大，在数据显示窗口，用户主要完成以下操作：

☺ 以多种图表格式显示数据。

☺ 使用标记读取仿真曲线上特定的数据。

☺ 使用方程式对数据进行处理。

1）菜单栏　菜单栏包含“File”、“Edit”、“View”、“Insert”、“Marker”、“History”、“Options”、“Tools”、“Page”、“Window”、“Help”11 个下拉菜单。

【File】主要包含文件的新建、打开、保存、关闭、打印等基本操作。

【Edit】主要包括对显示数据的编辑操作，如撤销、复制、粘贴等。

【View】数据显示视图的相关操作，如放大、缩小等。

【Insert】将各种元素插入到数据显示窗口中，如数据曲线、方程、表格、文字注释等。

【Marker】包含插入标记的各种操作，如极大值标记、极小值标记、最大值、最小值等。

【History】包含开启、暂停或关闭数据显示历史三个选项。

【Options】主要包含快捷键、工具栏设置和全局设置等。

【Tools】包含数据显示窗口的常用工具。

【Page】可以开启新的数据显示窗口，或将数据显示窗口重命名等。

【Window】可以新建或关闭数据显示窗口。

【Help】帮助菜单。

2）工具栏 一些常用的操作以快捷按钮的方式放在工具栏，便于操作，用户也可以通过菜单命令【Options】→【Hot Key/Toolbar Configuration】根据个人的实际需要进行定制。常用工具如下：

- : 重新绘制显示区内的图形
- : 使对象有效或失效
- : 自动调整图像尺寸
- : 将显示图像的某一区域放大
- : 放大某一数据点的附近区域
- : 缩小某一数据点的附近区域
- : 打开数据文件工具
- : 插入一个新的标记
- : 插入一个极大值标记
- : 插入一个极小值标记
- : 插入一个最大值标记
- : 插入一个最小值标记
- : 插入一个线性标记
- : 开启标记的 Delta 模式
- : 开启标记的 Offset 模式
- : 关闭标记的 Delta 模式和 Offset 模式

3）数据显示方式面板 仿真结果的数据可以用不同的方式显示出来，为了对不同的数据进行形象分析，必须选择合适的数据显示方式，用户可以在数据显示方式面板上进行选择。

- : 结束当前操作，返回鼠标指针状态
- : 直角坐标显示方式
- : 极坐标显示方式
- : Smith 圆图显示方式
- : 多个矩形图来显示不同曲线
- : 数据列表显示方式
- : 创建一个方程
- : 天线显示方式
- : 绘制线条
- : 绘制多边形
- : 绘制折线
- : 绘制矩形
- : 绘制圆形
- : 添加文本

第 2 章　ADS2012 基本操作及元件

本章将介绍 ADS2012 的基本操作，主要包括 ADS 原理图参数设置、ADS 工程相关操作、ADS 设计相关操作、ADS 仿真相关操作、ADS 仿真结果显示和分析相关操作，以及 ADS 输入、输出相关操作等。在此基础上，介绍 ADS 原理图设计仿真以及布局图设计仿真过程中经常用到的基本元件，主要有集总参数元件、分布参数元件、非线性元件及系统模型元件等。

2.1　ADS2012 基本操作

1．ADS 原理图参数设置

完成原理图参数设置主要由优选项（Preferences）来完成，通过菜单栏【Options】→【Preferences】，弹出菜单如图 2-1 所示。

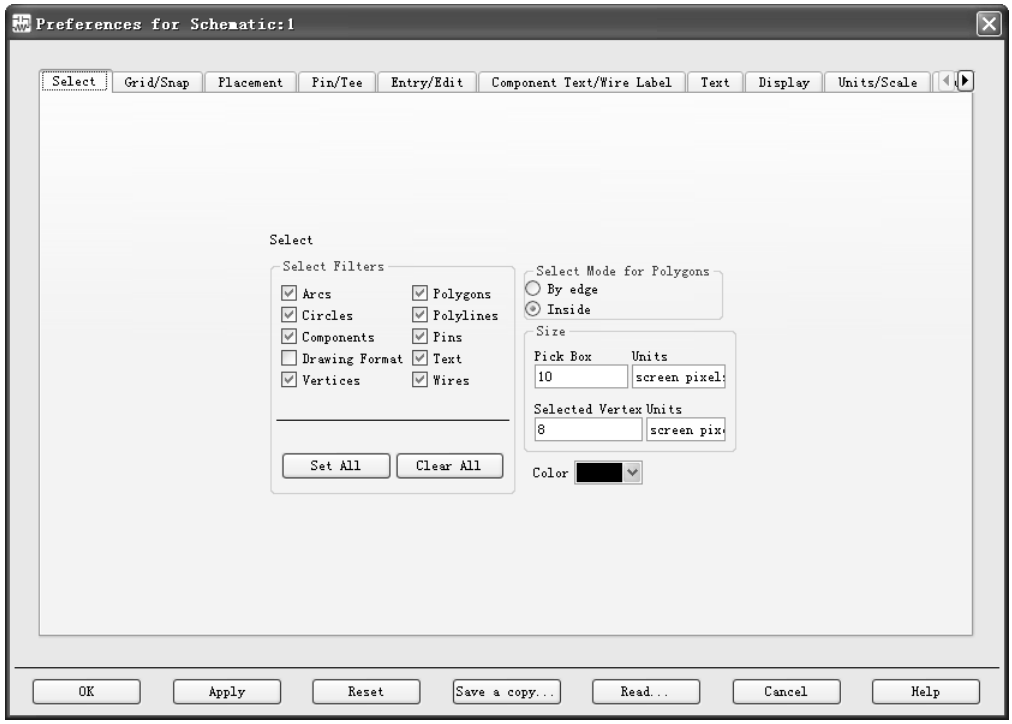


图 2-1　优选项菜单

优选项中包含“Select”、“Grid/Snap”、“Placement”、“Pin/Tee”、“Entry/Edit”、“Component Text/Wire Label”、“Text”、“Display”、“Units/Scale”、“Tune”10 个选项卡。

【Select】该选项卡包括“Select Filters”、“Select Mode for Polygons”、“Size”和“Color”等选项，如图 2-2 所示。

☺ Select Filters：包含 10 个选项，若用户用光标捕捉图中某一个图形，则经常会受到其他图形的影响，“Select Filters”可以帮助用户过滤掉原理图中不想捕捉到的图形。默认时，光标可以捕捉到原理图中所有的图形。

☺ Select Mode for Polygons:

- By edge：可以通过单击目标的边沿来选中该器件。
- Inside：可以通过单击多边形目标的任何位置来选中该器件。

☺ Size：“Pick Box”文本框中的值为光标捕捉的范围。在原理图上双击鼠标，光标捕捉范围内的图形将被选中，如图 2-3 显示出了这种变化。

☺ Color：设置选中图形的颜色。

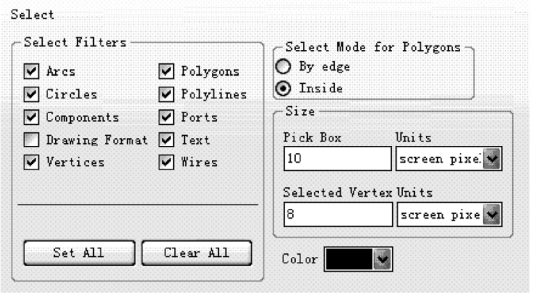


图 2-2 “Select”选项卡

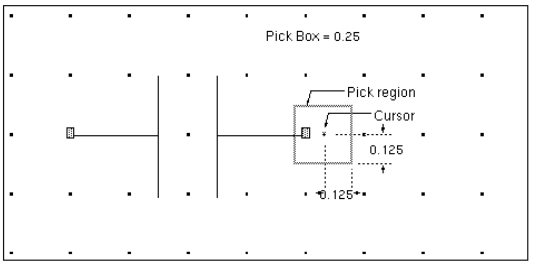


图 2-3 捕捉范围示意图

【Grid/Snap】该选项卡内容的设置可以方便原理图的绘制，使原理图整洁美观。其中包含“Display”、“Spacing”、“Active Snap Modes”和“Color”等内容，如图 2-4 所示。

☺ Display:

- Dots：原理图中的栅格由点组成。
- Lines：原理图中的栅格由线组成。
- None：原理图中不显示栅格。

☺ Spacing:

- Snap Grid Distance：设置光标移动一格的距离。
- Snap Grid per Display Grid：设置原理图中显示一个网络光标需要移动几次。
- Snap Distance-all other modes：设置光标要捕获元件需要靠近的距离。

☺ Active Snap Modes:

- Enable Snap：选中时，自动捕获元件。
- Pin：当放置一个新元件的引脚与原理图中已经存在的元件引脚在捕获距离内时，系统自动连接两个引脚。
- Vertex：放置的图形顶点与捕获网格的顶点自动对齐。
- Grid：单击网格就可捕获其中的元件。

☺ Color：设置原理图中网格的颜色。

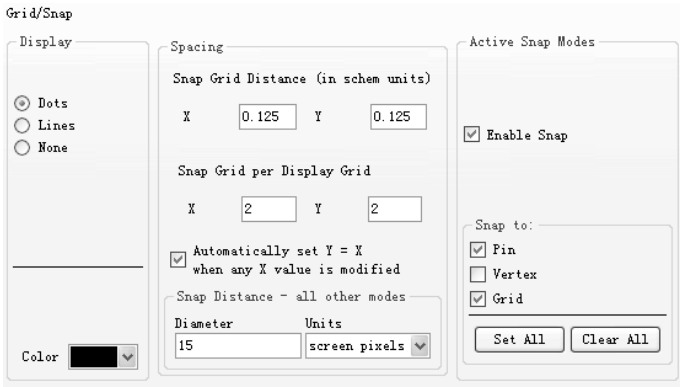


图 2-4 “Grid/Snap”选项卡

【Placement】如果在设计过程中对原理图进行修改，可能导致原理图与版图不一致。ADS2012 支持工程自动同步。用户在使用原理图和版图仿真时，可以同时选择布局模式。如果只进行原理图或版图仿真，则不需要对此项进行设置，如图 2-5 所示。

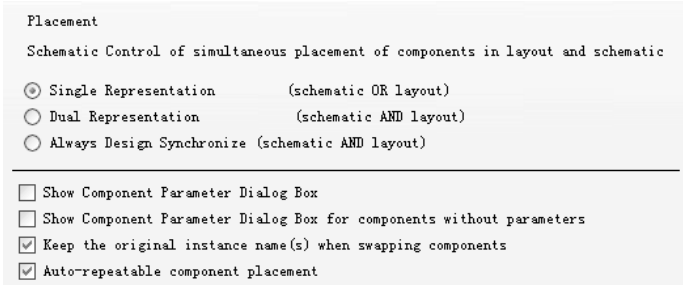


图 2-5 “Placement”选项卡

☺ Single Representation：适用于原理图或版图仿真。

☺ Dual Representation：适用于原理图和版图同时仿真。

☺ Always Design Synchronize：适用于原理图和版图同时仿真，原理图与版图的任何操作都保持实时同步。

【Pin/Tee】用户可以根据自己的喜好设置引脚和节点的大小与颜色，如图 2-6 所示。

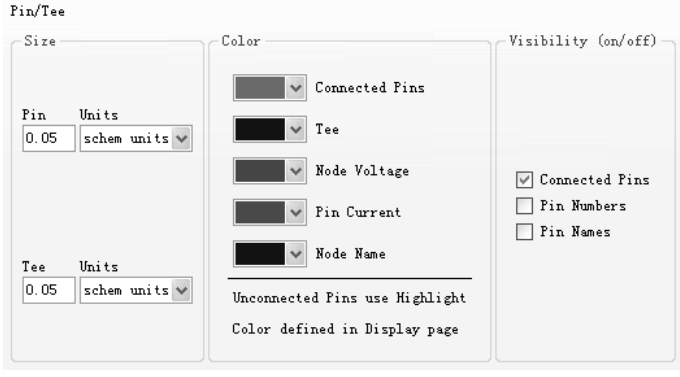


图 2-6 “Pin/Tee”选项卡

- Size:
 - Pin：设置元件引脚大小。
 - Tee：设置连线节点大小。
- Color：设置引脚和节点颜色。
- Visibility（on/off）:
 - Connected Pins：给已连接导线的引脚加红点标注。
 - Pin Numbers：显示引脚标号。
 - Pin Names：显示引脚名称。

【Entry/Edit】设置原理图中各种连线的基本规则，包括连线的绕行、转角、形状等，如图 2-7 所示。



图 2-7 “Entry/Edit”选项卡

- Wire Avoidance Routing Options:
 - Reroute entire wire attached to moved component：选中该项时，两个引脚之间连线可以穿过阻碍物，但不与阻碍物发生电气关系。
 - Route around component text：选中该项时，两个引脚在连线时会自动绕过两个引脚之间的文本。
 - Route around component symbol：选中该项时，两个引脚在连线时会自动绕过两个引脚之间的元件。
- Polygon/Polyline Entry Mode:
 - Any angle：可以绘制任意角度的折线。
 - 45 degree angle only：仅绘制 45° 折线。
 - 90 degree angle only：仅绘制 90° 折线。
- Arc/Circle resolution（degrees）Used when converting to polygons：在 ADS 中弧线或圆由许多小段构成，这个值指的是分辨率，实际就是弧线的光滑程度，如图 2-8 所示。
- Auto-backup edit count：系统自动备份的次数。
- Undo edit count：撤销操作次数。
- Rotation increment（angles）：设置元件旋转的次数。
- Drag and Move enabled：设置元件拖曳移动的最大距离。

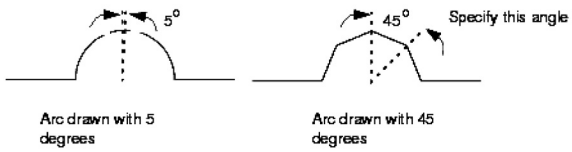


图 2–8　Arc/Circle resolution 设置示意图

【Component Text/Wire Label】在调用元件或仿真控制器时，都有各种注释文本，其中包括该元件的唯一编号、元件的参数。该选项卡主要设置文本和导线标注的字体、格式、颜色和属性，如图 2–9 所示。

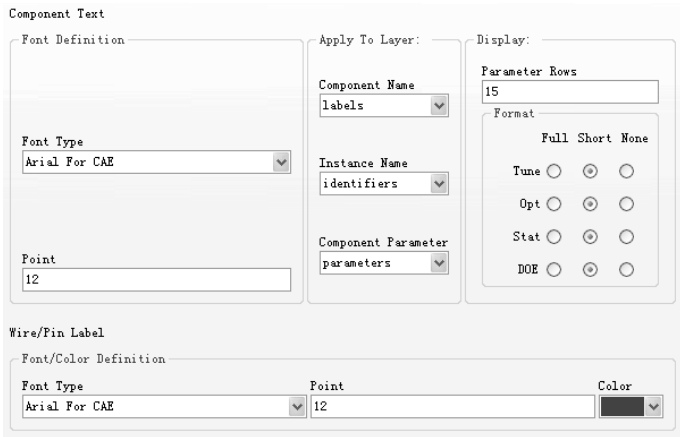


图 2–9 “Component Text/Wire Label”选项卡

☺ Font Definition:
- ✎ Font Type：选择显示文本字体。
- ✎ Point：文本大小。

☺ Apply To Layer:
- ✎ Component Name：元件名。
- ✎ Instance Name：例化名。
- ✎ Component Parameter：元件参数。

☺ Parameter Rows：代表在一列中显示组件文本行的最大数目。

☺ Format：本选项可以把原理图上显示的标注以缩写的形式给出。
- ✎ Full：完整显示，如 50 Ohm tune{ 25 Ohm to 75 Ohm by 5 Ohm }。
- ✎ Short：缩写形式显示，如 50 Ohm {t}。
- ✎ None：仅显示一个值，如 50 Ohm。

☺ Wire/Pin Label：可以选择线/引脚标志的字体、文本大小和标签颜色。

【Text】在设计工程中添加文字之前，可以设置文本属性，主要包括字体、格式、颜色和文本外框的形状等属性，如图 2–10 所示。

☺ Font Definition:
- ✎ Font Type：字体设置。
- ✎ Point：字号设置。

☺ Justification:

▻ Horizontal: 文本块水平位置设置。

▻ Vertical: 文本块垂直位置设置，相对于用户指定参考点开始输入文本。

☺ Placement Angle: 文本以一定角度添加到设计工程里。

☺ Non-rotating（when in hierarchy）: 选择此选项，以防止由于器件的旋转导致文本信息的旋转。

【Display】设置 ADS 图形用户界面中的颜色，如图 2-11 所示。

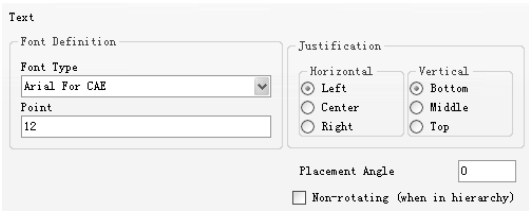


图 2-10 “Text”选项卡

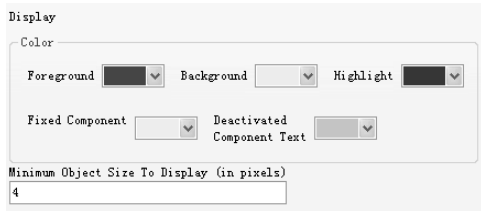


图 2-11 “Display”选项卡

☺ Foreground: 前景颜色。

☺ Background: 背景颜色。

☺ Highlight: 高亮标注。

☺ Fixed Component: 固定器件颜色。

☺ Deactivated Component Text: 无效元件的文本颜色。

☺ Minimum Object Size To Display（in pixels）: 器件在原理图上显示的最小尺寸。

【Units/Scale】设置原理图默认的单位和刻度。一般采用国际单位，如果放置的元件不适用默认单位时，可以双击该元件修改，如图 2-12 所示。

【Tune】可以通过该选项卡实现调谐控制，如图 2-13 所示。

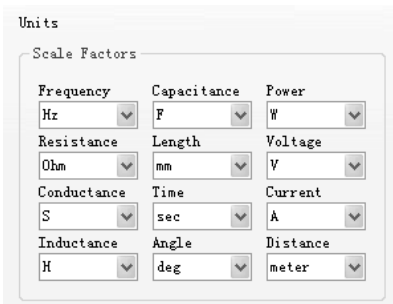


图 2-12 “Units/Scale”选项卡

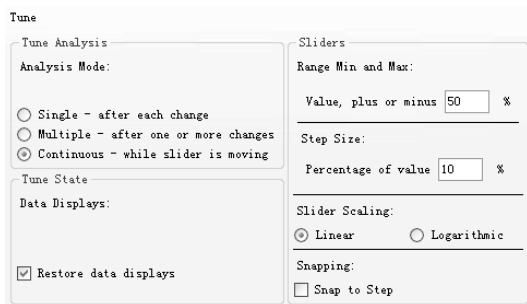


图 2-13 “Tune”选项卡

☺ Analysis Mode:

▻ Single: 元件值每改变一次就进行一次分析。

▻ Multiple: 只有在按下调谐按键以后才进行分析，适合多参数分析。

▻ Continuous: 跟随显示元件值的滑动条进行分析。

☺ Data Display:

▻ Restore data displays: 调谐开始时自动打开数据显示窗口并显示先前保存的数据文件。

☺ Sliders:

- Range Min and Max：设置被调谐元件的数值范围。
- Step Size：设置元件值的步长。
- Slider Scaling：元件滑动条变化方式（线性、对数）。
- Snapping：选中该项，滑动条按设置的步长变化，否则滑动条连续变化。

2．ADS 工程的相关操作——创建新工作空间

（1）在 ADS 的主窗口中执行菜单命令【File】→【New】→【Workspace】，弹出“New Workspace Wizard”对话框，如图 2-14 所示，将引导读者创建一个新的工作空间。

（2）单击 Next > 按钮，弹出新的对话框，如图 2-15 所示，在“Workspace name:”栏输入空间的名字，输入项目空间名称为 chapter2_wrk。保存路径默认为 C:\users\default。

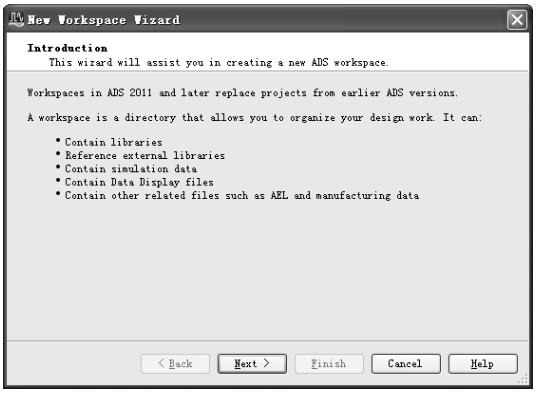


图 2-14 “New Workspace Wizard”对话框

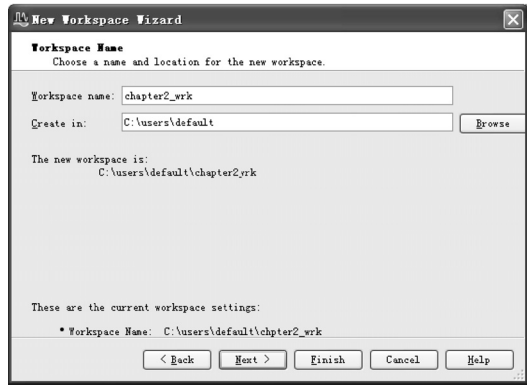


图 2-15　输入项目空间名称

（3）单击 Next > 按钮，弹出添加库文件对话框，如图 2-16 所示，系统默认添加了 Analog/RF 和 DSP 库，这里不做修改。

（4）单击 Next > 按钮，弹出为库文件添加名字对话框，如图 2-17 所示，系统默认名为项目空间名，这里不做修改。

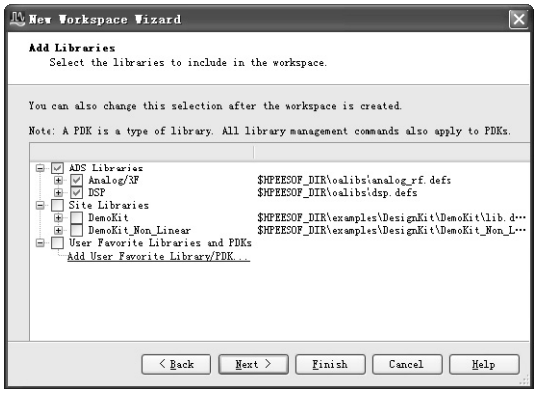


图 2-16　添加库文件对话框

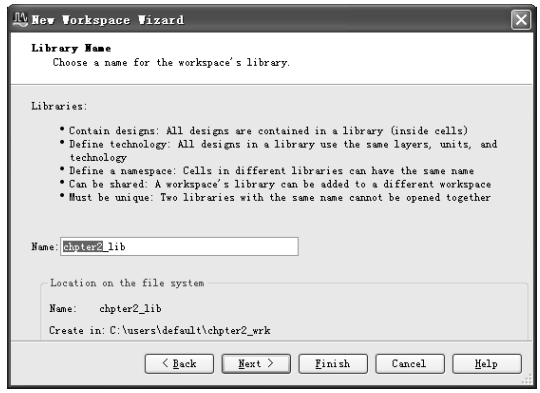


图 2-17　为库文件添加名字对话框

（5）单击 Next > 按钮，选择拓扑结构，主要是设置该工程空间使用的长度单位，选择第一项，如图 2-18 所示。

（6）单击 Next > 按钮，弹出创建项目空间“Summary”对话框，如图 2-19 所示，单击 Finish 按钮，项目空间创建完成。

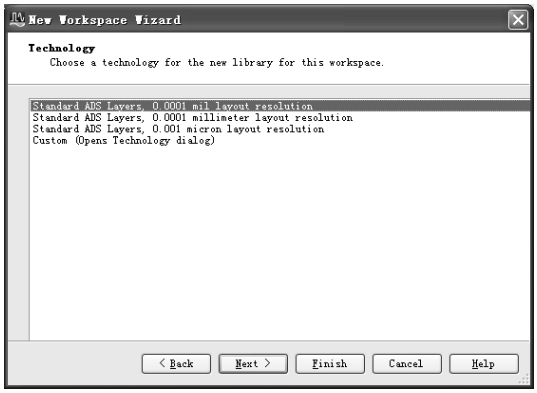


图 2-18　选择拓扑结构

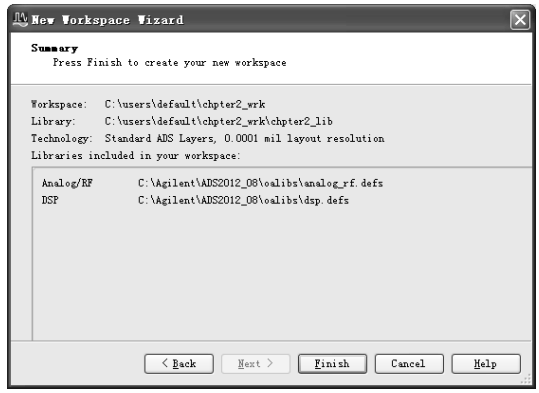


图 2-19　“Summary”对话框

工程创建完成后，窗口自动切换到图 2-20 所示的工程目录下，显示当前打开工程的层次结构，在“File View”、“Folder View”和“Library View”三个标签下可以查看新建项目空间的文件内容，新建的工程中各个子目录都为空。

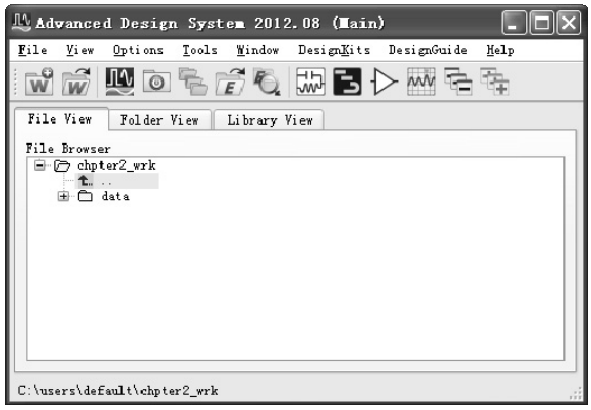


图 2-20　ADS 工程目录

3．ADS 设计相关操作

ADS 设计窗口主要可以完成的操作包括：创建和修改电路图及布局图，添加变量和方程，放置和修改元件，封装及仿真控制器，指定层和显示参数，插入文本及说明注释和原理图生成布局图等。

【创建新的原理图的方法】

☺ 在主窗口上选择【Window】→【New Schematic】创建新的原理图；

☺ 在主窗口上选择【File】→【New】→【Schematic】创建新的原理图；

☺ 在主窗口工具栏选择快捷按钮，创建一个新的原理图。

三种方法都将弹出新的菜单，如图 2-21 所示。在“Cell”栏输入原理图的名称，默认为 cell_1。在“Schematic Design Templates（Optional）”对话框中可以直接引入模板设计原

理图，简化了设计步骤，提高了设计的效率。

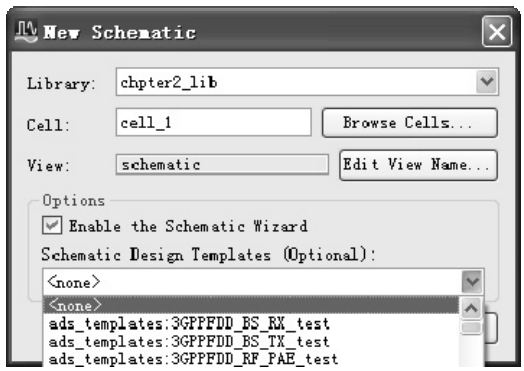


图 2-21　创建新设计

这里暂不选择设计模板，选择默认项<none>，单击 OK 按钮，如图 2-22 所示，这样就可以开始新的原理图的设计工作。

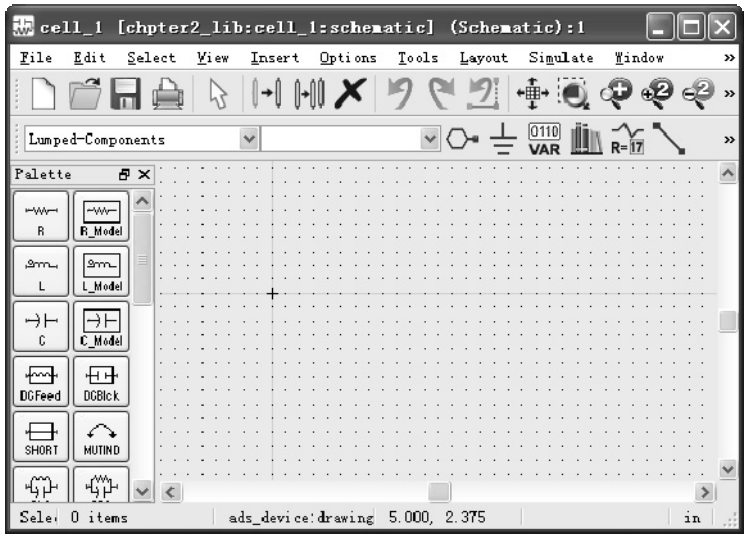


图 2-22　可以开始新的原理图的设计工作

4．ADS 仿真相关操作

ADS 提供多种可以配置的控制器来仿真、最优化及检测用户的设计，如交/直流仿真。用户可以同时设置多个仿真控制器设计，也可以插入相关模板实现相应设计，仿真设计的过程主要有以下三个步骤。

（1）在元件面板中选择合适的仿真控件；

（2）设置相关仿真控件参数；

（3）仿真，查看结果。

5．ADS 仿真结果显示和分析相关操作

仿真结束后，用户需要观察仿真结果和分析相关数据，为了更好地观察仿真结果，用

户可以通过添加识别指定的数据点标记或文本来进行注释。

【打开数据显示结果】在主窗口、原理图窗口或布局窗口可以查看仿真结果，选择【Window】→【Open Data Display】，使用对话框载入结果。

【使用函数】用户可以利用等式对仿真中产生的数据进行操作，这些等式的表述基于应用扩展语言（AEL）来实现。

2.2 ADS2012 元件

1．集总参数元件

组成电路模型的元件都是能反映实际电路中元件主要物理特征的理想元件，电路中元件在工作过程中还与电磁现象有关，常见的三种最基本的理想电路元件为：

☺ 表示消耗电能的理想电阻元件 R;

☺ 表示储存电场能的理想电容元件 C;

☺ 表示储存磁场能的理想电感元件 L。

当实际电路的尺寸远小于电路工作时电磁波的波长时，可以把元件的作用集总在一起，用一个或多个 R、L、C 元件来描述，这样的电路称为集总参数电路。集总参数元件是具有两个端钮的元件，从一个端钮流入的电流等于从另一个端钮流出的电流，端点间的电压为单值量。

在原理图设计窗口，选择“Lumped-Components”主件控制面板，其中主要包括电感、电容和电阻等常用集总参数元件。

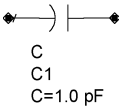


图 2-23 一般电容符号

1）电容

【一般电容】一般电容符号如图 2-23 所示，其主要参数见表 2-1。

表 2-1 一般电容参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说 明
C	电容值	fF，pF，nF，μF，mF
TEMP	温度	℃
Trise	电容温度与外界温度关系	℃
Tnom	标称温度	℃
TC1	线性温度系数	1/℃
TC2	二次温度系数	$1/℃^2$
wBV	击穿警告电压	fV，pV，nV，μV，mV, V
InitCond	瞬态分析初始状态	
Model	电容模型例化名	
Width	物理宽度	μm，mm，cm，meter，mil，in，ft
Length	物理长度	μm，mm，cm，meter，mil，in，ft
_M	并联电容数	

【含 *Q* 值电容（CAPQ）】*Q* 值是衡量电容的重要指标，含有 *Q* 值的电容符号如图 2-24

所示，其主要参数见表 2-2。

表 2-2　含有 *Q* 值的电容参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
C	电容值	fF，pF，nF，μF，mF
Q	*Q* 值	$Q=\frac{2\pi fC}{G}$
F	当前 *Q* 值对应的工作频率	*F*>0
Model	*Q* 值与频率的关系	Model=1：*Q* 值与频率成正比 Model=2：*Q* 值与频率平方成正比 Model=3：*Q* 值独立于频率

【直流阻塞电容（DC_BLOCK）】直流阻塞电容是用来在电路中隔掉直流成分的理想器件模型，电路符号如图 2-25 所示，其主要参数见表 2-3。

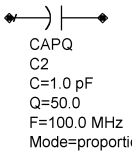


图 2-24　含有 *Q* 值的电容符号

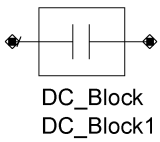


图 2-25　直流阻塞电容符号

表 2-3　直流阻塞电容参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
C	电容值	fF，pF，nF，μF，mF
L	DC 反馈电感	
Gain	电流增益	
wImax	最大电流	fA，pA，nA，μA，mA，A
Model	指示功能	-1：直流反馈 0：短路 1：直流阻塞

直流阻塞电容对暂态分析是非因果的，参数 *C* 和 *L* 通常用于暂态分析，且电容的值是有限值，默认为 1μF。

2）电感

【一般电感】一般电感符号如图 2-26 所示，其主要参数见表 2-4。

表 2-4　一般电感参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
L	电容值	fH，pH，nH，μH，mH
R	串联电阻值	mΩ，Ω，kΩ，MΩ，GΩ
TEMP	温度	℃
Trise	电感温度与外界温度关系	℃

续表

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Tnom	标称温度	℃
TC1	线性温度系数	1/℃
TC2	二次温度系数	$1/℃^2$
InitCond	瞬态分析初始状态	
Noise	是否产生噪声	
Model	电感模型例化名	
_M	并联电感数	

【含 *Q* 值电感（INDQ）】*Q* 值是衡量电感的重要指标，含有 *Q* 值的电感符号如图 2-27 所示，其主要参数见表 2-5。

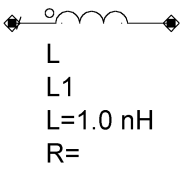


图 2-26　一般电感符号

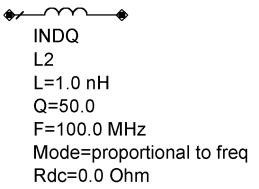


图 2-27　含有 *Q* 值的电感符号

表 2-5　含有 *Q* 值的电感参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
L	电感值	fH，pH，nH，μH，mH
Q	*Q* 值	$Q=\frac{2\pi fC}{G}$
F	当前 *Q* 值对应的工作频率	*F*>0
Model	*Q* 值与频率的关系	Model=1：*Q* 值与频率成正比 Model=2：*Q* 值与频率平方成正比 Model=3：*Q* 值独立于频率

【直流阻塞电感（DC_Feed）】直流阻塞电感是用来在电路中隔掉交流成分的理想器件模型，电路符号如图 2-28 所示。参数与直流阻塞电容一致。

3）电阻

【一般电阻】一般电阻符号如图 2-29 所示，其主要参数见表 2-6。

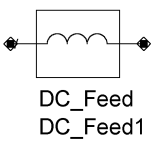


图 2-28　直流阻塞电感符号

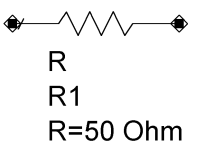


图 2-29　一般电阻符号



表 2-6　一般电阻参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
R	电阻值	mΩ，Ω，kΩ，MΩ，GΩ
TEMP	温度	℃
Trise	电阻温度与外界温度关系	℃
Tnom	标称温度	℃
TC1	线性温度系数	1/℃
TC2	二次温度系数	$1/℃^2$
Noise	是否产生噪声	
wPmax	最大功率	pW，nW，μW，mW，W，kW，dBm，dBW
wImax	最大电流	fA，pA，nA，μA，mA，A，kA
Model	电阻模型例化名	
Width	物理宽度	μm，mm，cm，meter，mil，in，ft
Length	物理长度	μm，mm，cm，meter，mil，in，ft
_M	并联电阻数	

4）RLC 连接结构　除了单个的集总参数元件外，ADS 还提供了集总参数元件的各种连接方式，主要有电感电容并联结构和电感电容串联结构。

【电感电容并联结构】电感电容并联结构主要有两种：PLC 和 PLCQ，它们的主要区别是 *Q* 值不同，电路符号如图 2-30 所示。

【电感电容串联结构】电感电容串联结构主要有两种：SLC 和 SLCQ，它们的主要区别是 *Q* 值不同，电路符号如图 2-31 所示。

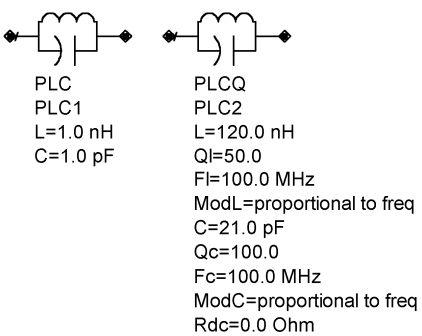


图 2-30　两种电感电容并联结构

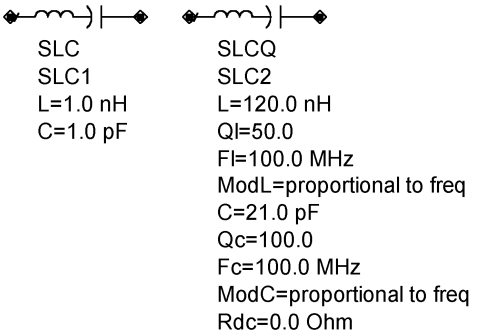


图 2-31　两种电感电容串联结构

【其他结构】常见的其他连接方式包括电阻电容并联结构、电阻电感并联结构、电阻电感电容并联结构、电阻电容串联结构、电阻电感串联结构以及电阻电感电容串联结构等，如图 2-32 所示。

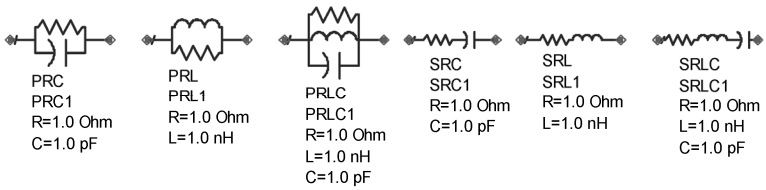
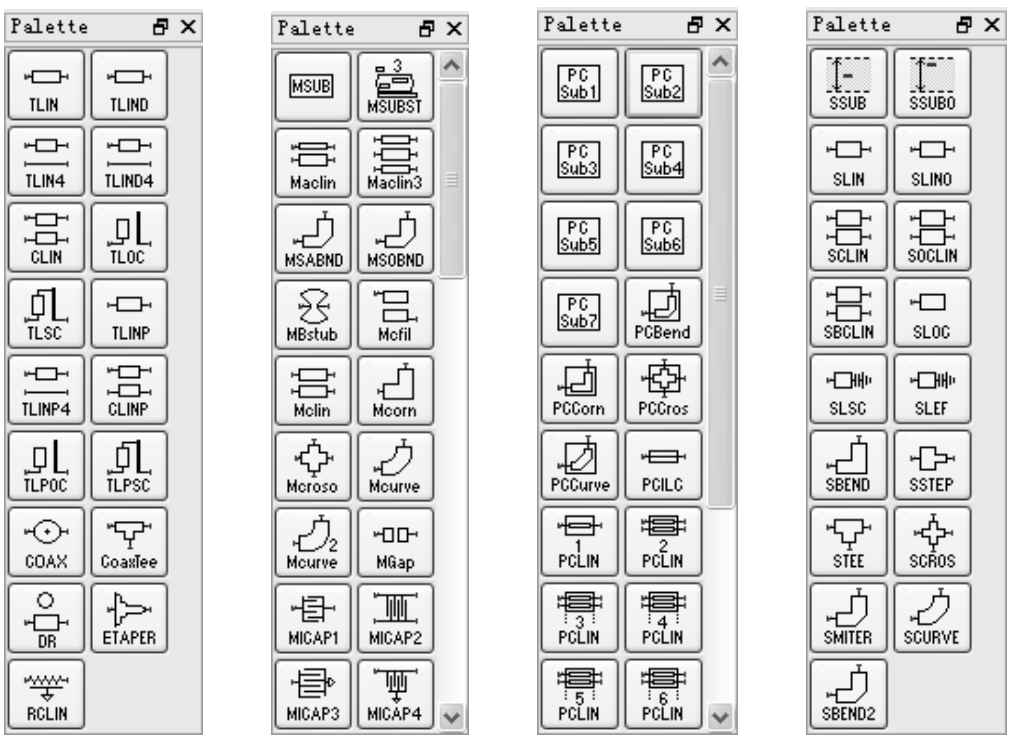


图 2-32　其他电路结构

2．分布参数元件

ADS 提供了各种分布参数元件，如理想传输线（TLines-Ideal 元件库）、微带线（TLines-Microstrip 元件库）、印制电路板传输线（TLines-Printed Circuit Board 元件库）、带状线（TLines-Stripline 元件库）、波导（TLines-Waveguide 元件库）等，如图 2-33 所示。



理想传输线　　微带线印制电路板　　传输线　　带状线

图 2-33　常见分布参数元件面板

3．非线性元件

ADS 非线性器件有二极管（Diode）、双极型晶体管（BJT）、砷化镓（GaAs）、结型场效应管（JFET）、场效应管（MOS）及恩智浦半导体模型（NXP SiMKit）。

【二极管】ADS “Device-Diodes” 元件库提供了多种二极管模型，如图 2-34 所示。其相关参数丰富，用户可以根据实际需要进行设置。

【BJT、GaAS、MOS 和 JFET】ADS 提供了 BJT、GaAs、MOS 和 JFET 等非线性器件，如图 2-35 所示。

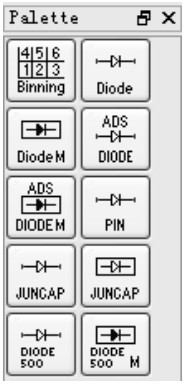


图 2-34　二极管元件面板

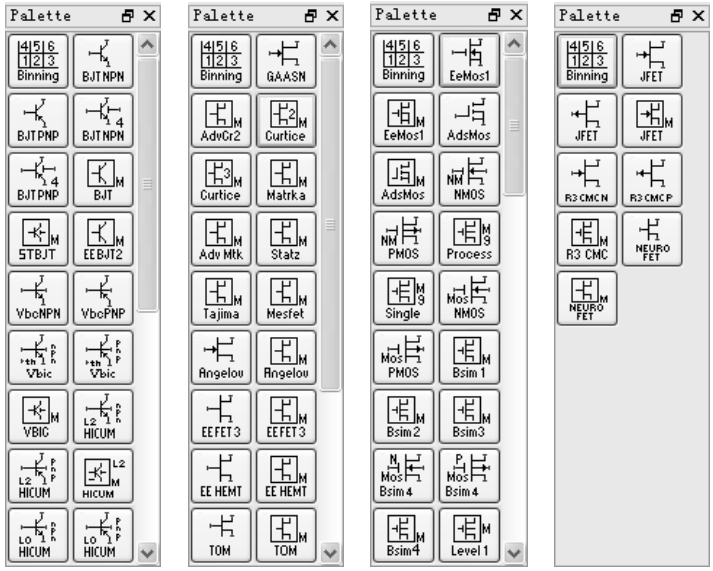


图 2-35　BJT、GaAs、MOS 和 JFET 元件面板

4．系统模型元件

ADS 可提供电路级和系统级的仿真功能，在系统级仿真中，用户可以使用射频电路中的各种系统模型元件进行仿真。ADS 主要系统级模块有放大器、混频器、滤波器、调制解调器、锁相环和收发机子系统等。

【放大器和混频器】射频电路系统中利用放大器进行信号放大操作，利用混频器对信号进行上变频或下变频操作。ADS 提供的放大器和混频器模块主要有自动增益控制功能的放大器模块、运算放大器模块、描述非线性性能的混频器模块和带有本振信号的混频器等，用户可以通过选择“System-Amps & Mixers”元件类添加各个模块，如图 2-36 所示。

【滤波器】ADS 提供了高通、低通、带通和带阻等多种形式的滤波器，用户可以通过选择“Fillers-Highpass”、“Fillers-Lowpass”、“Fillers-Bandpass”、“Fillers-Bandstop”元件类来添加各个模块，如图 2-37 所示。

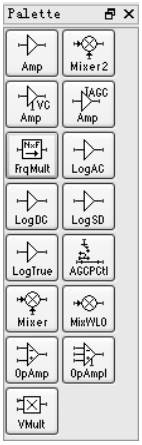


图 2-36　放大器和混频器面板

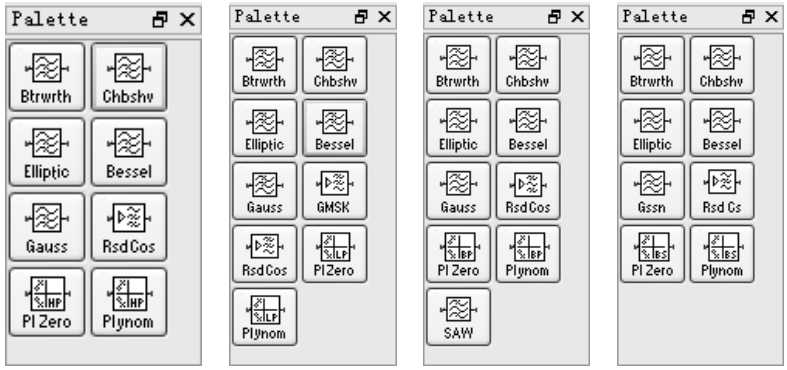


图 2-37　高通、低通、带通和带阻滤波器面板

【调制解调模块】ADS 提供了多种形式的调制解调模块，主要包括 AM、FM、PM、BPSK 和 QPSK 等，用户可以通过选择“System-Mod/Demod”元件类添加各个模块，如图 2-38 所示。

【锁相环模块】在射频电路中，锁相环可以产生本振信号。锁相环电路主要由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器等组成。用户可以通过选择“System-PLL Components”元件类添加各个模块，如图 2-39 所示。

【收发机子系统模块】收发机子系统模块包含发信机子系统、收信机子系统以及简单的放大器模块。收发机子系统可以进行收/发信机的行为级仿真，提供整个收/发信机系统级的参数。用户可以通过选择“Tx/Rx Subsystems”元件类添加各个模块，如图 2-40 所示。

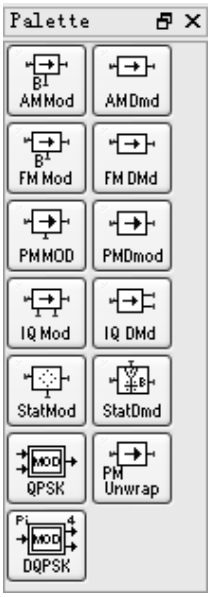


图 2-38　调制解调模块面板

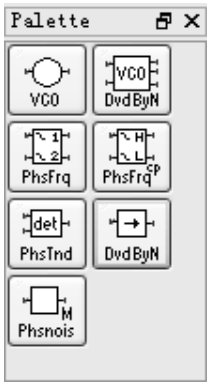


图 2-39　锁相环模块面板

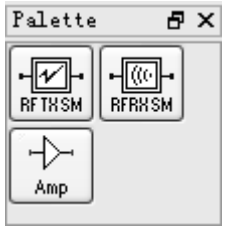


图 2-40　收发机子系统模块面板

5. 信号源

ADS 信号源主要包括受控源、频域信号源、调制信号源、噪声信号源和时域信号源。

【受控源】ADS 中的受控源包括电流控制电流源（CCCS）、电流控制电压源（CCVS）、电压控制电流源（VCCS）和电压控制电压源（VCVS）以及它们的 z 域形式，受控源可通过选择“Sources-Controlled”元件类来查看，如图 2-41 所示。

【频域信号源】频域信号源用来分析电路或者系统的稳态响应。ADS 提供的频域信号源有直流源、交流源、单频信号源、多频信号源以及带有相位噪声的本振源等。用户可通过选择“Sources-Freq Domain”元件类添加各种频域信号源，如图 2-42 所示。

【调制信号源】调制信号源直接用来产生用户需要的标准调制信号，不需要通过混频器等信号调制模块。调制信号源一般为功率源或电压源，ADS 提供的调制信号源有 CDMA 调制信号源、GSM 调制信号源以及各种脉冲信号和阶跃信号源，用户可通过选择“Sources-Modulated”元件类添加各种调制信号源，如图 2-43 所示。

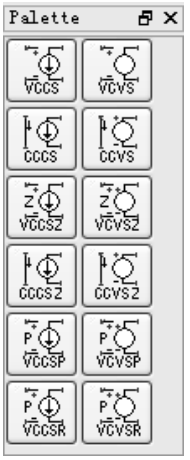


图 2–41　受控源



图 2–42　频域信号源

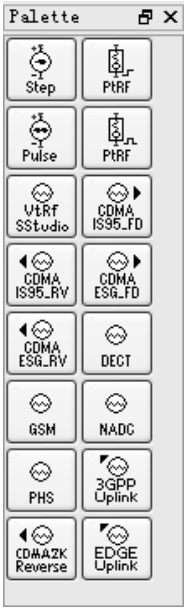


图 2–43　调制信号源

【噪声信号源】用户利用噪声信号源分析电路或系统的噪声系数等噪声指标。ADS 提供了电流噪声源和电压噪声源，用户可通过选择“Sources-Noise”元件类添加各种噪声信号源，如图 2–44 所示。

【时域信号源】时域信号源用于时域仿真，ADS 提供的时域信号源有时钟信号源、数字信号源、正弦余弦信号源等。用户可通过选择“Sources-Time Domain”元件类添加各种时域信号源，如图 2–45 所示。

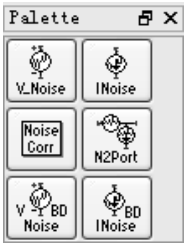


图 2–44　噪声信号源

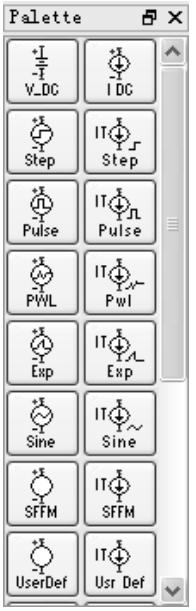


图 2–45　时域信号源

第 3 章　ADS2012 仿真基础

本章介绍 ADS2012 仿真的基础内容，主要通过实例说明 ADS2012 电路仿真和系统仿真的一般方法。

3.1　电路仿真基础

本节包括用户基础界面的使用及 ADS 原理图、仿真控件、仿真设置和数据显示等文件创建过程，还包括调谐与谐波平衡法仿真的简单实例。

3.1.1　电路仿真基本操作

1．建立新项目和原理图设计

按 2.1 节的方法，新建项目空间，命名为 chapter3_wrk，其他选项默认，如图 3-1 所示。

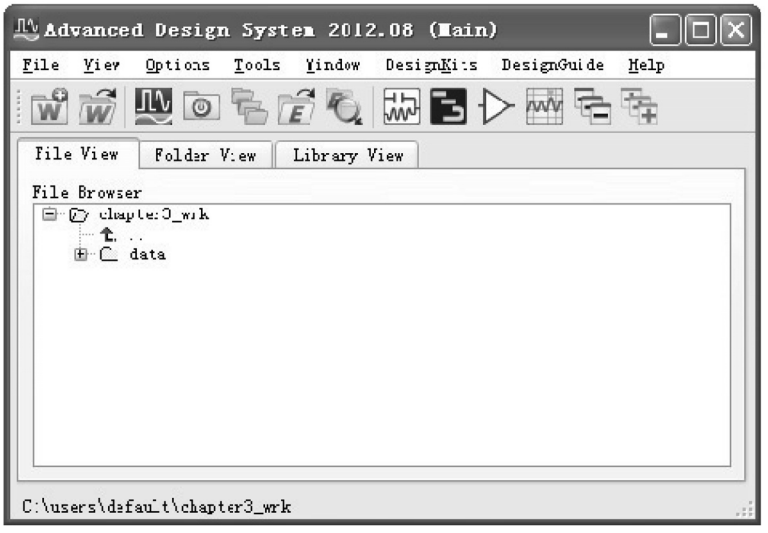


图 3-1　新建项目空间

2．建立一个低通滤波器设计

（1）在主窗口，单击 图标，弹出对话框，命名为 Lpf，如图 3-2 所示。

（2）单击 OK 按钮，弹出原理图设置向导，退出向导，单击 Cancel 按钮。 进入原理图绘制界面，单击 按钮，保存原理图。

（3）在元件模型列表窗口中选择“Lumped-Components”集总参数元件类，如图 3-3 所示。

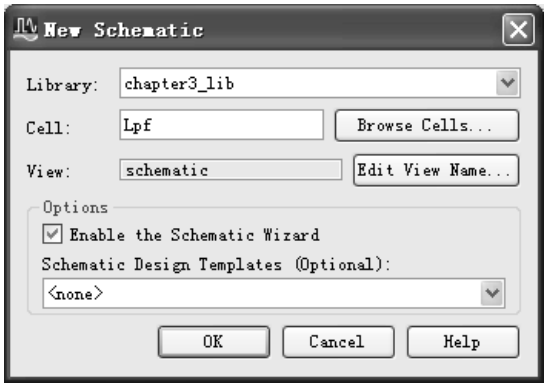


图 3-2　“New Schematic”对话框

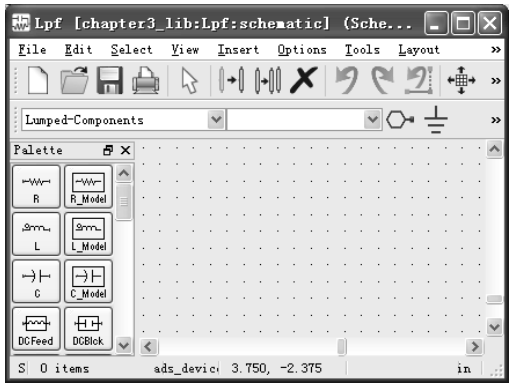


图 3-3　元件库示意图

（4）在图 3-3 左边面板中选择电容图标，将其放置到电路图设计窗口中，并利用工具旋转电容，如图 3-4 所示。

（5）用类似的方法将电感放置到电路图设计窗口中，并利用接地图标，把电容器的一端接地。利用连线图标将它们连起来，如图 3-5 所示。

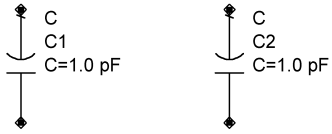


图 3-4　放置电容

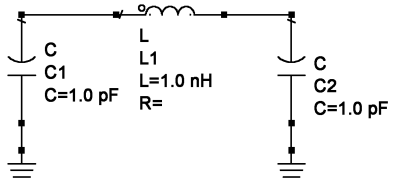


图 3-5　部分电路连接图

（6）在元件库列表窗口选择“Simulation-S_Param”项，在该项面板中选择 Simulation-S_Param 模拟控制器和端口 Term 放到原理图中。双击电容 C2 并修改其参数，如图 3-6 所示。

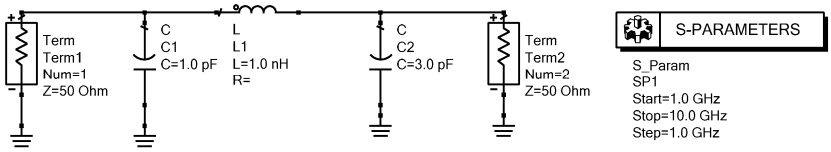


图 3-6　Lpf 电路原理图

3．设置 S 参数控件参数

（1）双击 S 参数控件，打开参数设置窗口，将“Step-size”设置为 0.5GHz，如图 3-7 所示。

（2）单击“Display”标签，列出了所有可以显示在原理图中的仿真控件参量，如图 3-7 所示，用户可以在前边小方框中打钩来定义需要显示的参量。

（3）单击 OK 按钮，保存返回。

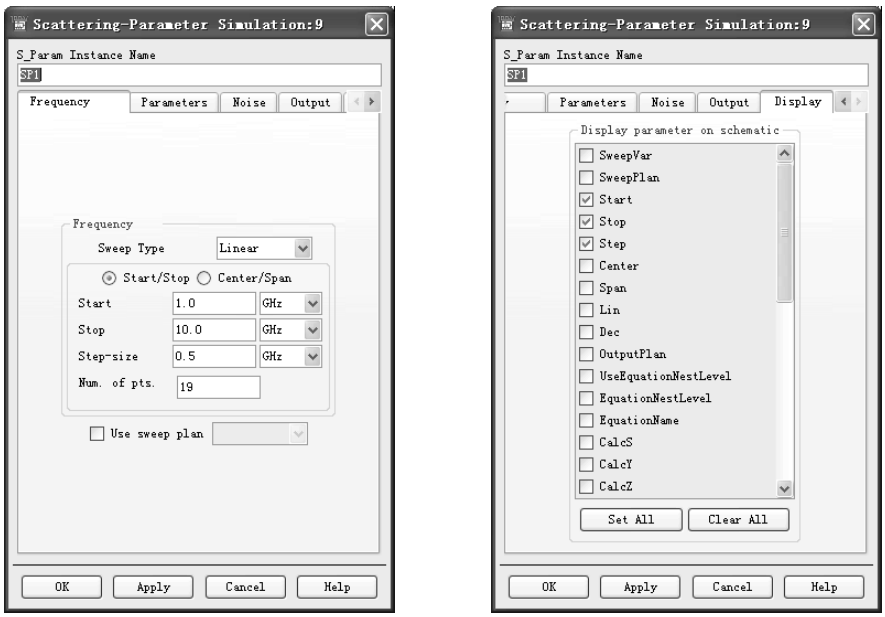


图 3-7　仿真控件参数设置

4．显示仿真数据

（1）单击菜单栏【Simulate】→【Simulate】或仿真图标，开始仿真。

（2）弹出状态窗口，显示仿真状态的相关信息，如图 3-8 所示。

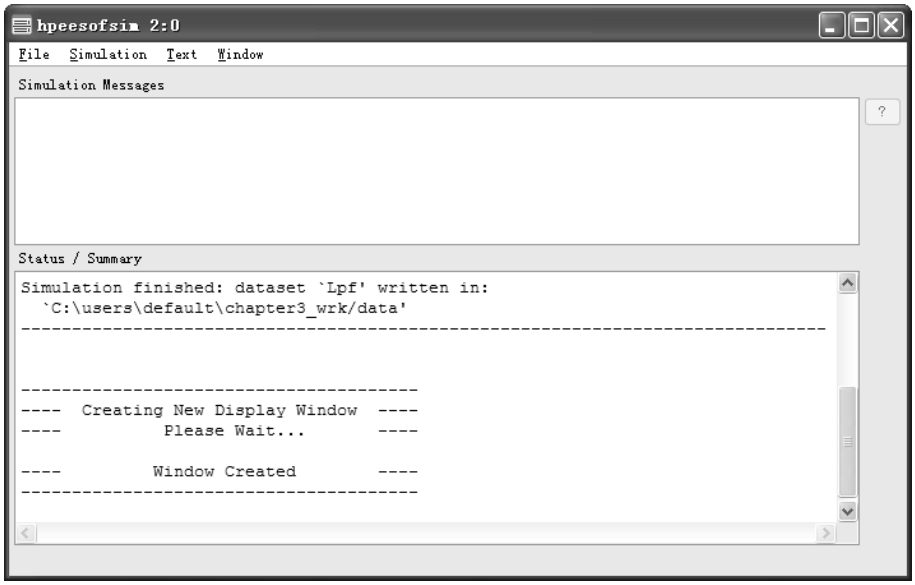


图 3-8　仿真状态窗口

（3）仿真完成以后，如果没有错误，可以通过数据显示窗口查看仿真结果，如图 3-9 所示。数据显示窗口左上方显示当前设计名称为“Lpf”，该窗口可以把仿真数据以表格、圆

图或等式的形式显示出来。

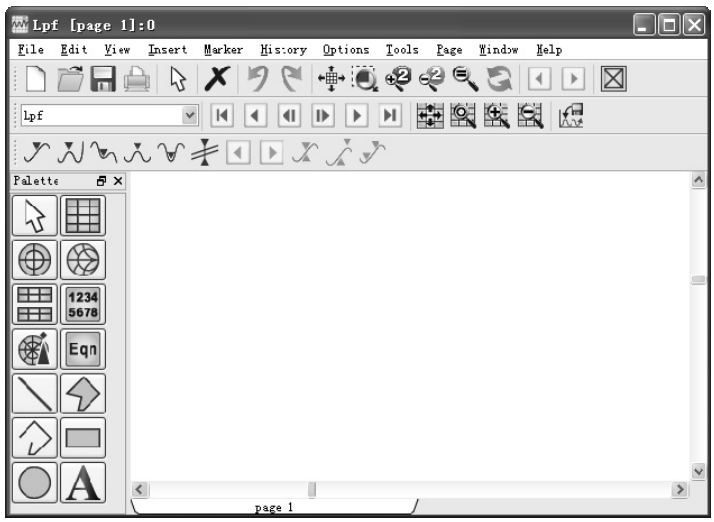


图 3-9　数据显示窗口

（4）矩形图图标是以方块图形显示数据，单击后会自动弹出对话框，选择要显示的 S（2，1）参数，单击 >>Add>> 按钮，选择单位为 dB，如图 3-10 所示，单击 OK 按钮。显示低通滤波器的响应，如图 3-11 所示曲线。

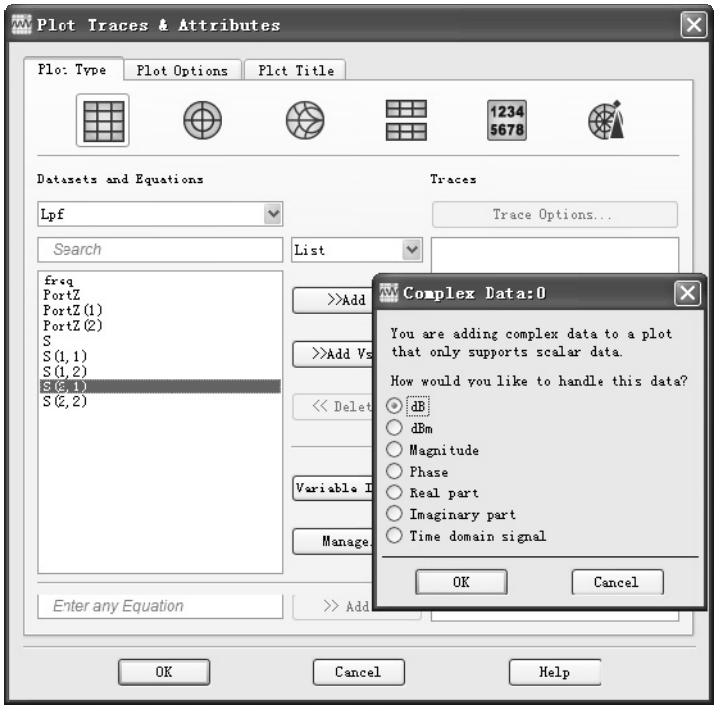


图 3-10　矩形图设置窗口

（5）单击菜单栏【Marker】→【New】，将三角标志放置到仿真曲线上，选中该标志，可用键盘和鼠标控制其位置，如图 3-11 所示。

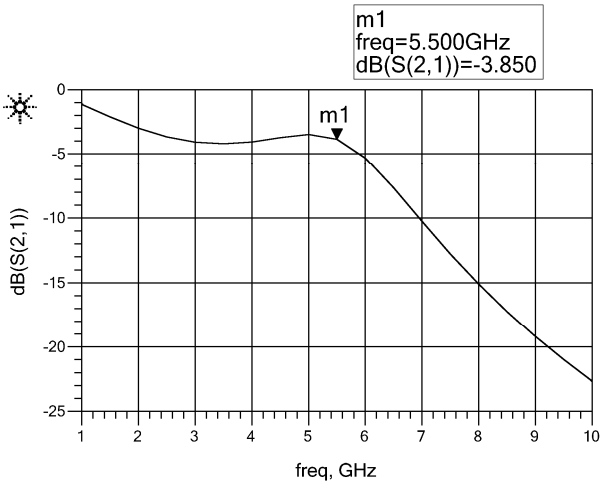


图 3-11　在曲线上添加标记

5．保存数据窗口

保存数据文件的默认名称为 Lpf，扩展名为.dds，该文件会保存在当前项目文件夹的根目录中，如图 3-12 所示。可以直接单击图标查看仿真结果。

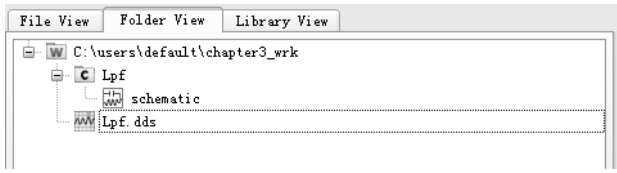


图 3-12　保存数据文件

6．调整滤波器电路

（1）单击原理图窗口中的图标，原理图窗口会自动调整原理图显示方式使其与当前窗口的大小相适应。

（2）在 Lpf 原理图窗口单击调谐图标，出现调谐参数设置窗口，如图 3-13 所示。

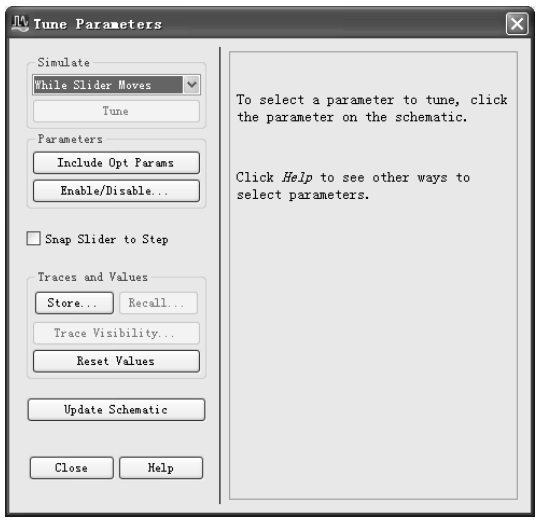


图 3-13　调谐参数设置窗口

（3）在 Lpf 原理图窗口中，用光标选择 L1 和 C2，如图 3-14 所示，调谐参数窗口变为如图 3-15 所示的样式。

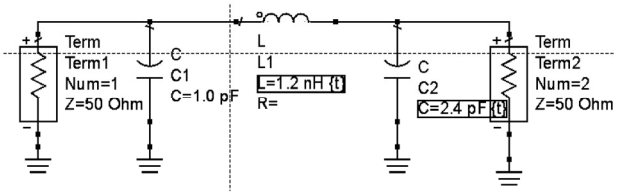


图 3-14　在原理图窗口选中 C2 和 L1

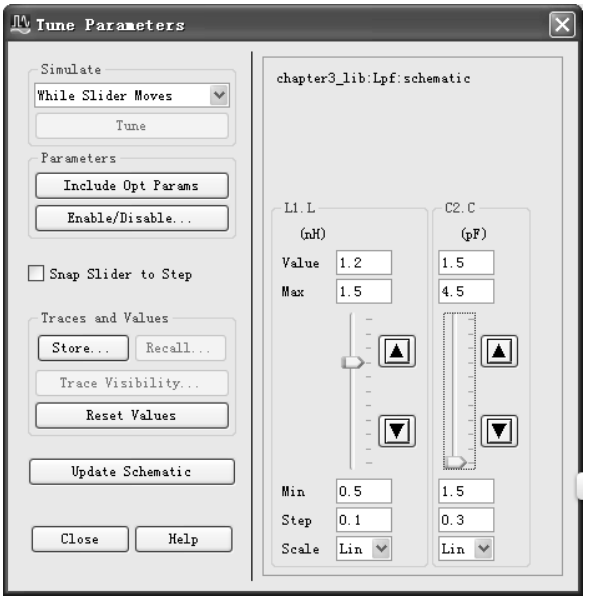


图 3-15　新的调谐参数窗口

在调谐参数窗口中，可以直接修改最大、最小、调节步长和变化比例等参数。

（4）在数据窗口中调节 L1 和 C2 电感、电容值，仿真曲线会实时变化，同时三角标志会自动调整到最新的曲线上。

（5）调节过程中，单击 Update Schematic 按钮，可以更新原理图中相应元件的参数值。也可以在原理图中用光标增加更多的元件参与调整参数。

（6）调整到仿真曲线达到技术指标后，单击 Close 按钮，保存该参数。

3.1.2　利用谐波平衡法对放大器仿真

ADS2012 软件含有大量的实例，用户可以在范例目录里找到 ADS 提供的所有范例。本节主要介绍利用谐波平衡法对放大器仿真的例子。

（1）进入 ADS 主窗口，单击查看范例目录图标 查看范例名称列表。从范例目录选择，依 RFIC→amplifier_wrk.7zap→HBtest.dsn→schematic 顺序打开原理图。

（2）如图 3-16 所示，该原理图为顶层设计。单击放大器 X1，选中该器件，再单击工

具栏图标，进入放大器底层电路，如图 3-17 所示，单击返回顶层电路。

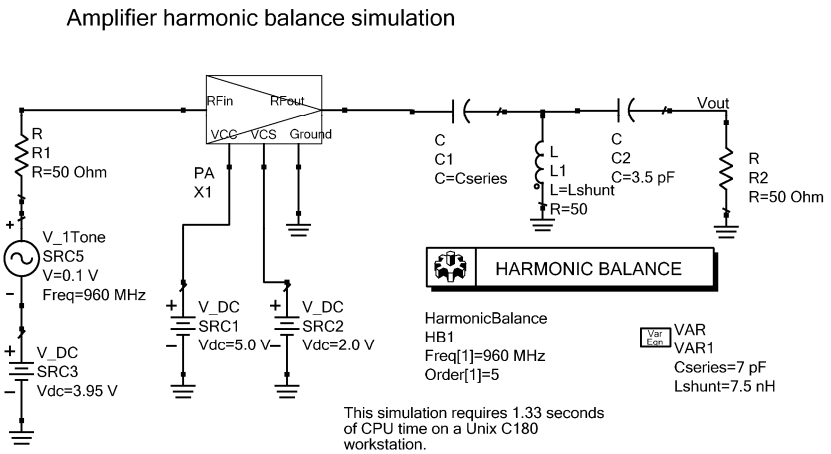


图 3-16　放大器 HB 仿真原理图

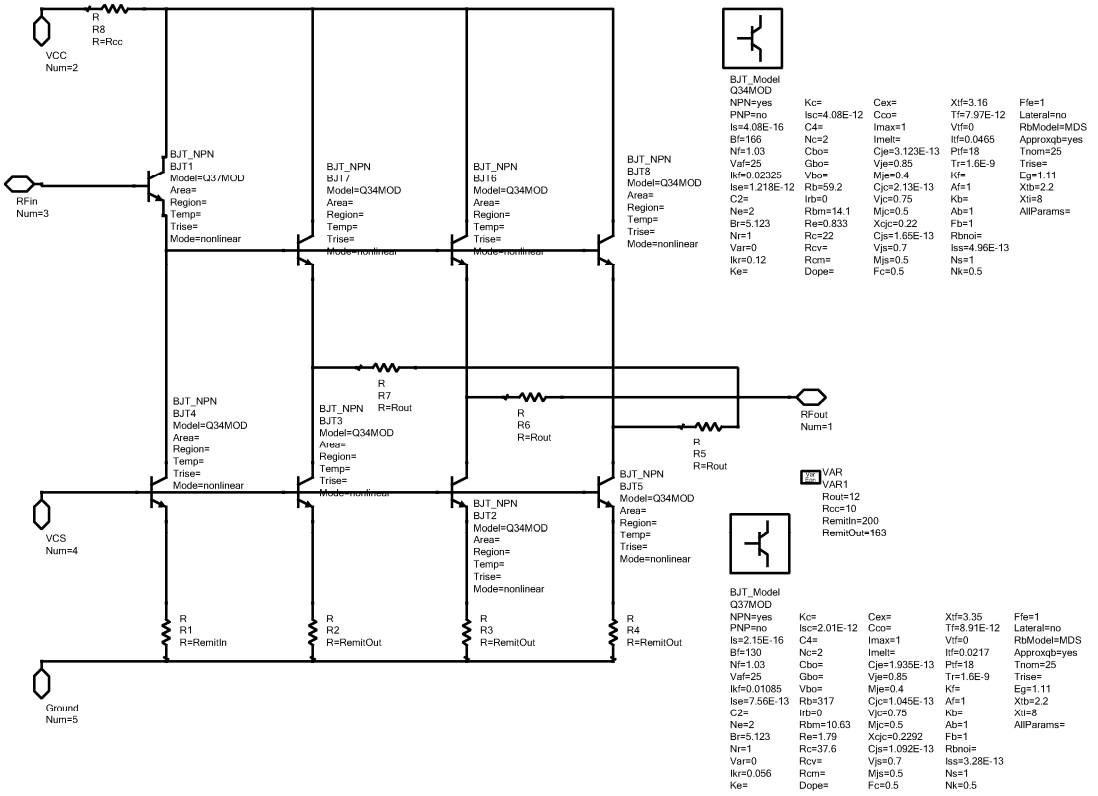


图 3-17　放大器子电路图

（3）在顶层电路原理图中，双击“Harmonic Balance controller”可进行谐波平衡控制器参数设置。控制器谐波设置为计算 5 次谐波，基频信号频率为 960MHz。

（4）单击工具栏“Name”图标，出现对话框后，在“Wire/Pin Label”栏输入名称“Vin”，如图 3-18 所示，单击放大器 X1 的输入端的引线或节点。再输入名称“Vout”，设

置放大器 X1 的输出端口线，该原理图就有了“Vin”和“Vout”引线符号，如图 3-19 所示，完成后单击 Close 按钮。

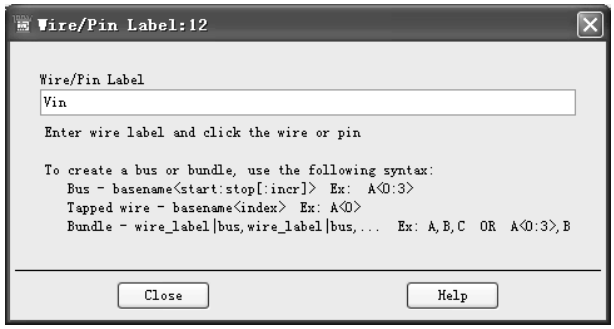


图 3-18　添加节点名称

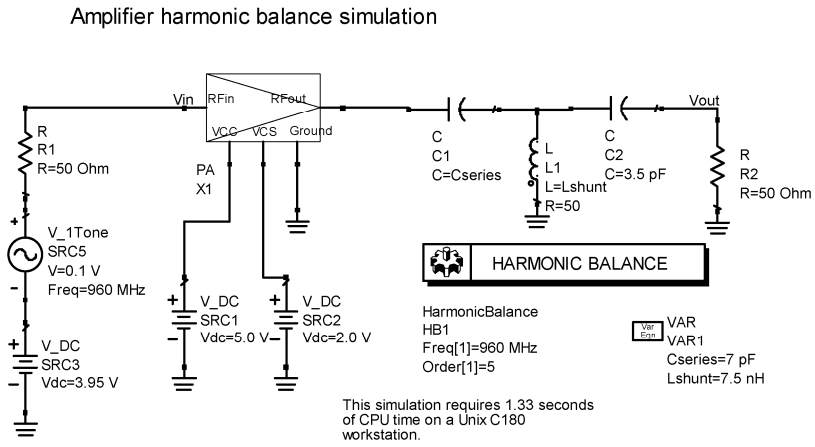


图 3-19　引入输入、输出标识的放大器 HB 仿真原理图

（5）单击仿真按钮，查看仿真数据，如图 3-20 所示。

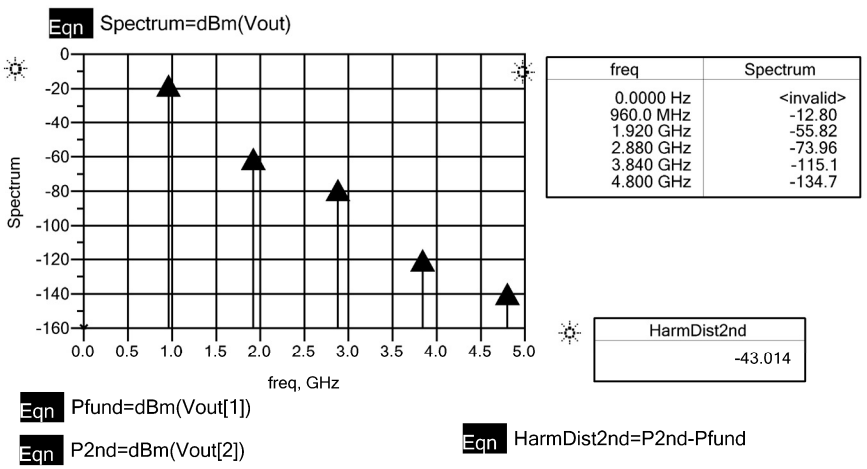


图 3-20　仿真结果

3.2 系统仿真基础

本节介绍利用行为级模型建立系统（如 RF 接收系统）的方法步骤，通过对系统行为级模型的仿真接近所需的系统性能。先设定系统组件所需的性能，然后逐步用独立的电路替换，并可以比较两者的性能差异。

☺ 利用行为模型（滤波器、放大器、混频器）建立 RF 接收系统，其中 RF = 1 900MHz，IF = 100MHz。

☺ 使用 RF 源，带相位噪声的本振 LO 和噪声控制器。

☺ 测试 S 参数、输出频谱、噪声等参数性能。

3.2.1 系统仿真基本操作

本节建立行为级模型构成的 RF 接收系统，主要步骤如下。

（1）单击图标，在当前项目空间新建原理图，命名为 rf_sys。

（2）打开原理图窗口，在“Filters-Bandpass”组件面板中，在原理图上放置一个带通滤波器控件，参数设置如图 3-21 所示。

> 🕮 Butterworth 带通滤波器的行为级模型是理想的，在通带内没有波纹。换成滤波器和放大器的电路模型以后，会产生波纹。对于带波纹的系统滤波器，可以采用椭圆滤波器的行为级模型。

（3）在“System-Amps & Mixers”组件面板中，在原理图上放置放大器控件，设定 S21＝dbpolar（10，180），参数设置如图 3-22 所示。

（4）在“Simulation-S_Param”组件面板中，在原理图上放置端口控件，作为端口 1，如图 3-23 所示。

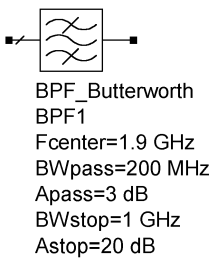


图 3-21 Butterworth 带通滤波器控件

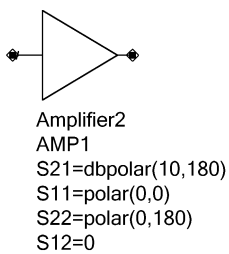


图 3-22 放大器控件

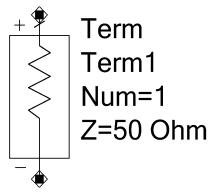


图 3-23 端口 1

（5）在“System-Amps & Mixers”组件面板中，在原理图上放置混频器控件，设定混频器参数 ConvGain＝dbpolar（3，0）。这里 dbpolar 表示以“dB”表示的 Gain，代表 3dB。设定混频器参数 SideBand＝LOWER，取混频器输出的下边带，参数设置如图 3-24 所示。

（6）在“Sources-Freq Domain”组件面板中，在原理图上放置端口控件，设置频率为 1.8GHz，如图 3-25 所示。

（7）在“Lumped-Components”组件面板中，在原理图上放置电阻，大小设置为 50Ω，50 Ω电阻连接“V_1Tone”源，“V_1Tone”源接地，这样可以提供 100MHz 的中频输出。

（8）在“Filters-Lowpass”组件面板中，在原理图上放置低通滤波器控件，设置 Fpass＝200MHz，如图 3-26 所示。

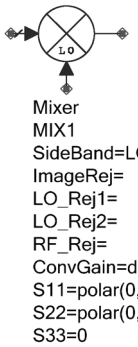


图 3-24　混频器控件

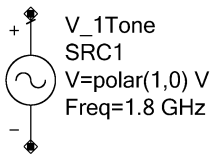


图 3-25　源控件

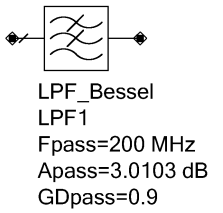


图 3-26　贝塞尔低通滤波器控件

（9）在“Simulation-S_Param”组件面板中，在原理图上放置端口控件，作为端口 2，用作 Bessel 滤波器的输出端口，最终的系统电路如图 3-27 所示。

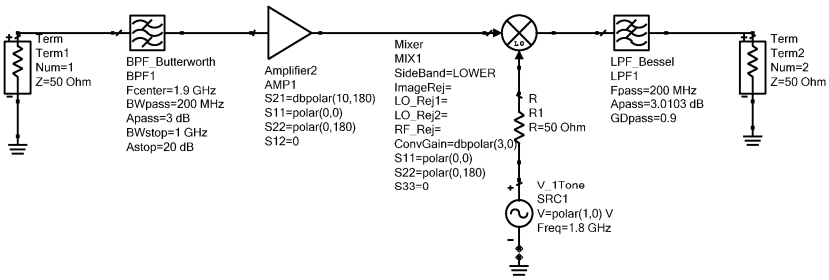


图 3-27　RF 接收系统电路原理图

> 移动元件文本块，先按 F5 键，然后再选中元件来移动文本框，这样能更清楚地检查元件的连接情况，并且可以通过移动文本框使各元件的文本说明部分不相互重叠，方便查看。

3.2.2　系统仿真

1．设置带频率转换的 S 参数仿真

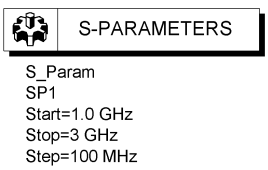


图 3-28　S 参数仿真控制器

（1）在“Simulation-S_Param”组件面板中，在原理图上放置控件，如图 3-28 所示，设定模拟参数为：

☺ Start=1.0GHz

☺ Stop=3GHz

☺ Step=100MHz

（2）在原理图上单击 SP 控件，编辑模拟控制器，在“Parameters”标签内选上“Enable AC frequency conversion”，如图 3-29 所示。

（3）在“Display”标签内选择“FreqConversion”和“FreqConversionPort”两项，如图 3-30 所示，让其在原理图中显示出来。此时，S 参数仿真控件变成图 3-31 所示样式。

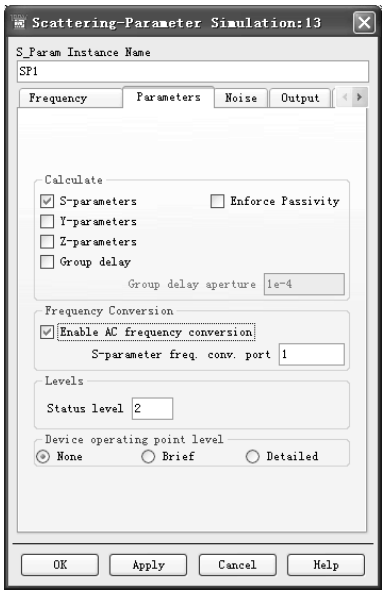


图 3-29 “Parameters”标签设置

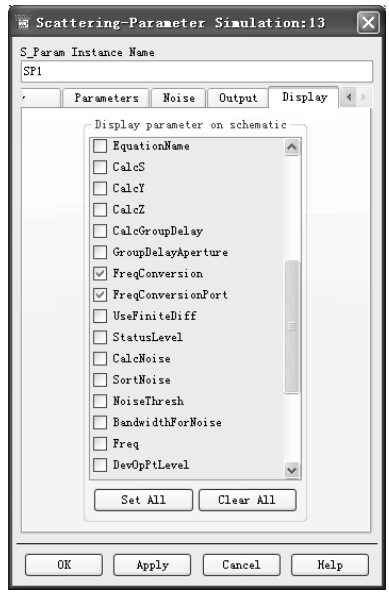


图 3-30 “Display”标签设置

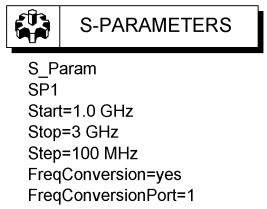


图 3-31 设置后的 S 参数仿真控制器

（4）单击【Simulate】→【Simulation Setting…】，出现仿真设置对话框，在“Data Display”项前，把☑ Use cell name前面的对号去掉，把默认名改为“rf_sys10dB”，代表该系统在放大器增益为 10dB 时的输出结果，如图 3-32 所示。

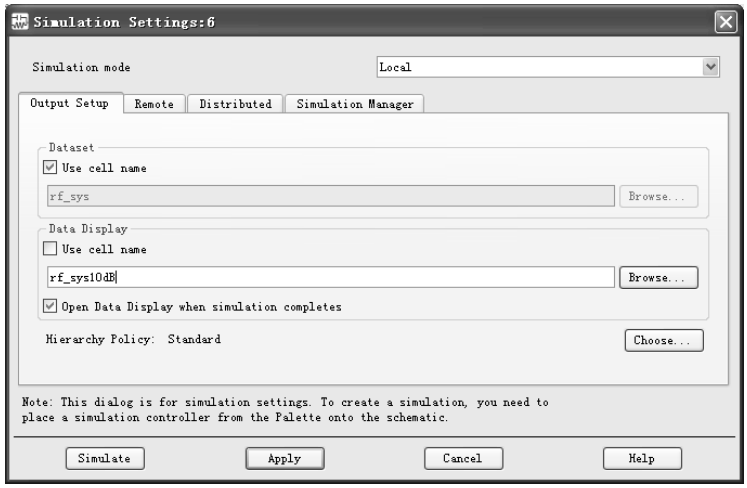


图 3-32 “Simulation Settings”设置

（5）单击 Apply 和 Simulate 按钮开始仿真。

（6）在数据显示窗口中插入矩形图显示 S21 图形，如图 3-33 所示。

（7）把标记放到曲线 1 900MHz 的位置上。S(2,1)表示混频器的转换增益减去因为失配造成的损耗。

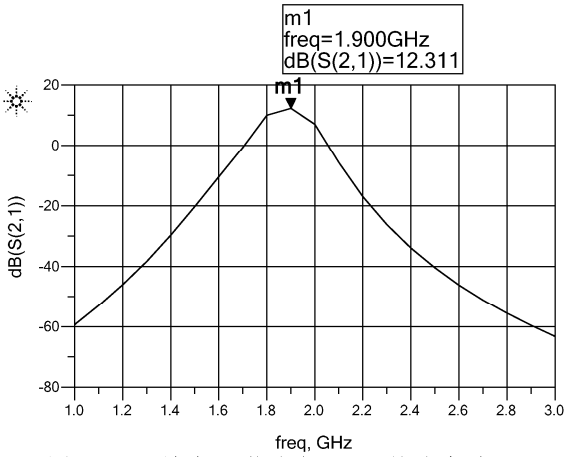


图 3-33　放大器增益为 10dB 的仿真结果

（8）回到原理图，改变放大器增益 S21 至 20dB，如图 3-34 所示。

（9）同步骤（4），单击【Simulate】→【Simulation Setting…】，出现仿真设置对话框，在“Data Display”项前，把 Use cell name 前面的对号去掉，把默认名改为“rf_sys20dB”，代表该系统在放大器增益为 20dB 时的输出结果，单击 Apply 按钮，开始仿真。

（10）双击编辑已绘制 10dB 仿真曲线的矩形图。出现对话框，在“Datasets and Equations”栏中选择“rf_sys_20dB”，如图 3-35 所示。

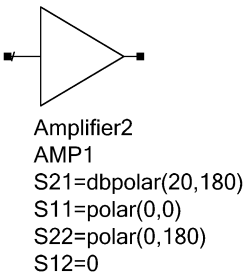


图 3-34　改变增益后的放大器模型

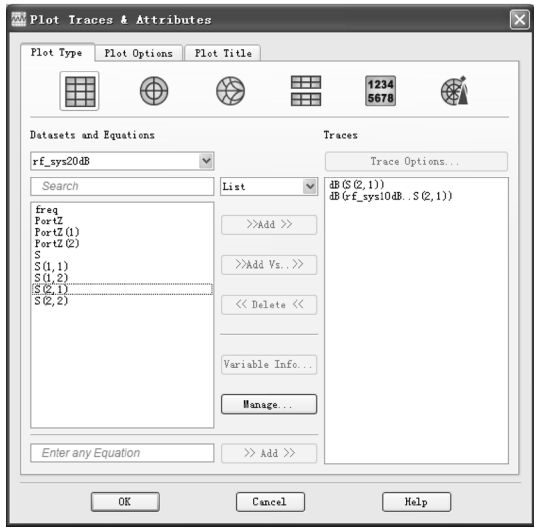


图 3-35　添加 20dB 放大器仿真结果

（11）选择 S21 数据，单位为 dB，让 S21 在数据显示窗口显示。

【注意】 由于 Datasets 不是默认设置，其路径会显示出来。

（12）单击命令【Marker】→【New…】，插入新的 Marker 标志，查看两个仿真之间具有 10dB 的差值，即在放大器增益为 20dB 时，S21 为 12.313dB+10dB=22.313dB。如图 3-36 所示，保存数据，关闭数据显示窗口。

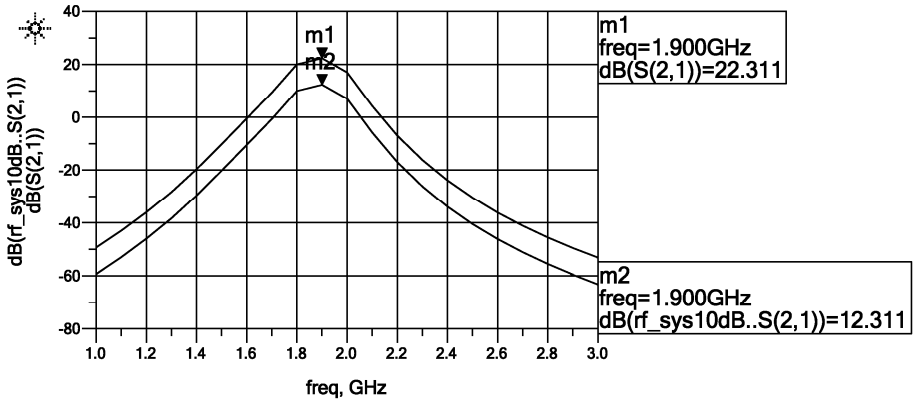


图 3-36 两种增益放大器仿真结果

2．谐波平衡仿真

接下来使用谐波平衡控制器仿真振荡器行为级模型产生的相位噪声。

（1）单击图标，在当前项目空间新建原理图，命名为 rf_sys_phnoise，复制 rf_sys 原理图，修改该原理图。

（2）删除“S_param”仿真控制器控件、“V_1Tone”本振源、50Ω电阻和接地。

（3）打开原理图窗口，在“Sources-Freq Domain”组件面板中，在原理图上放置一个源控件，用“P_1Tone”源更换 port1 的“Term”， 设定功率和频率为 Freq＝1.9GHz，P＝polar（dbmtow（−40），0）。参数设置如图 3-37 所示。

【注意】 polar 与 dbpolar 单位不同，把源的名称改为 RF_source，Num = 1。

（4）在工具栏单击按钮，在电路图输出端插入 Vout 节点标记。

（5）在“Sources-Freq Domain”组件面板中，插入控件，连接到混频器 mixer 上。设定参数 Freq＝1.8GHz，修改“Phase Noise list”参数，如图 3-38 所示。OSCwPhNoise 自带 50Ω电阻，注意这和“V_1Tone”加 50Ω电阻的功能类似。

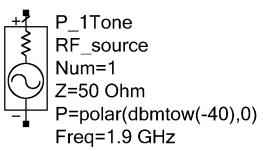


图 3-37 Butterworth 带通滤波器控件

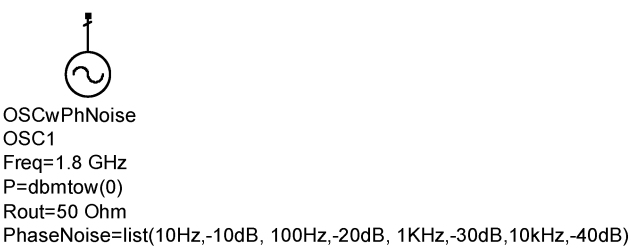


图 3-38 OSCwPhNoise 参数设置

（6）加入相位噪声的原理图如图 3-39 所示。

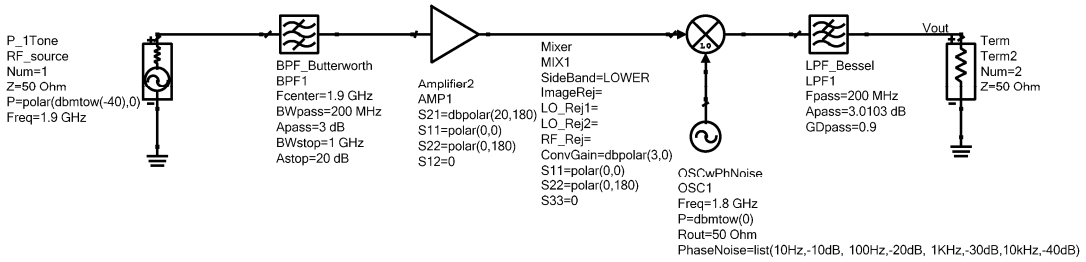


图 3-39　用于谐波平衡仿真的系统原理图

（7）在“Simulation-HB”组件面板中，插入噪声控制器，如图 3-40 所示。

> 📖 NoiseCon 噪声控制器和 HB 谐波控制器一起使用，便于用户把仿真控制和噪声测量分开。也可以在使用一个 HB 谐波控制器的情况下，为不同的噪声测量设定和使用多个 NoiseCon 噪声控制器。

（8）双击噪声控制器，其“Freq”标签如图 3-41 所示。

☺ Sweep Type 设置为 log 扫描方式

☺ Start=10Hz

☺ Stop=10kHz

☺ Pts./decade=5

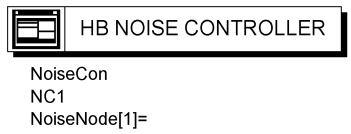


图 3-40　噪声控制器

（9）在“Nodes”标签中点击“Pos Node”下拉框，选择 Vout 节点，单击 Add 按钮。噪声控制器同其他的 ADS 组件一样，能够在原理图中修改节点的名称，如图 3-42 所示。

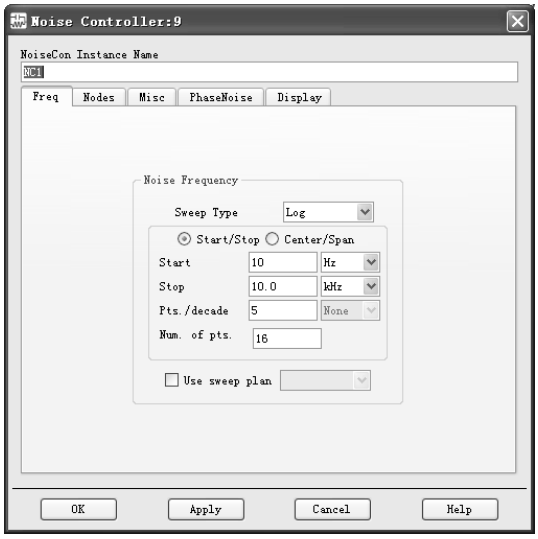


图 3-41　噪声控制器“Freq”参数设置

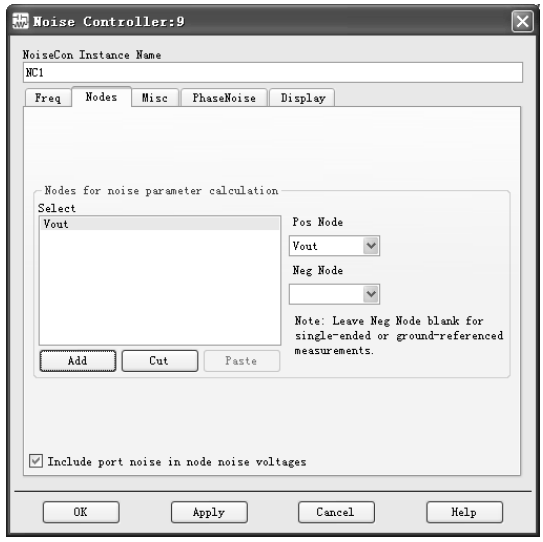


图 3-42　噪声控制器“Nodes”参数设置

（10）在“PhaseNoise”标签中选择“Phose Noise Type”相位噪声类型为“Phase noise spectrum”，设定载频“Frequency”为 100MHz。这是由本振引入的相位噪声的中频频率，如图 3-43 所示。

（11）在显示标签“Display”标签中把相关参数显示在原理图上，设置后的相位噪声控制器如图 3-44 所示。

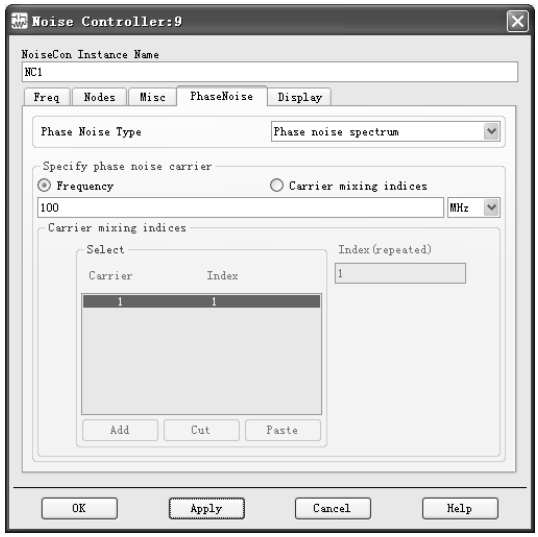


图 3-43　噪声控制器“PhaseNoise”参数设置

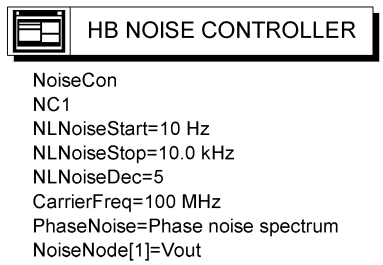


图 3-44　设置后的噪声控制器

3．设置谐波仿真

（1）在“Simulation-HB”组件面板中插入模拟控制器。

（2）编辑 HB 控制器，把默认的频率值改为 1.8GHz，单击 Apply 按钮。然后增加 RF 频率 1.9GHz，单击 Apply 按钮，如图 3-45 所示。

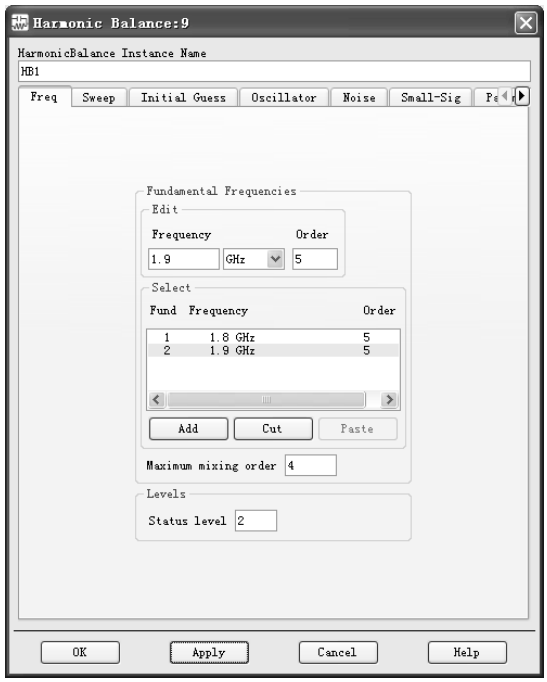


图 3-45　HB 仿真控制器的“Freq”参数设置

（3）在“Display”标签中显示 MaxOrder 参数，单击 Apply 按钮。

> 只需在控制器中指定本振的频率（1.8GHz）和 RF 频率（1.9GHz）。不需要指定其他的频率，因为“Order”和“Maximum mixing order”的默认值将计算电路中其他的“tones”，包括 100MHz 的中频。

（4）如图 3-46 所示，在“Noise”标签中选择“NoiseCons”。然后在“Edit”栏选择 NC1 为用户设定的 NoiseCons 的实例名称，单击 Add 和 Apply 按钮。

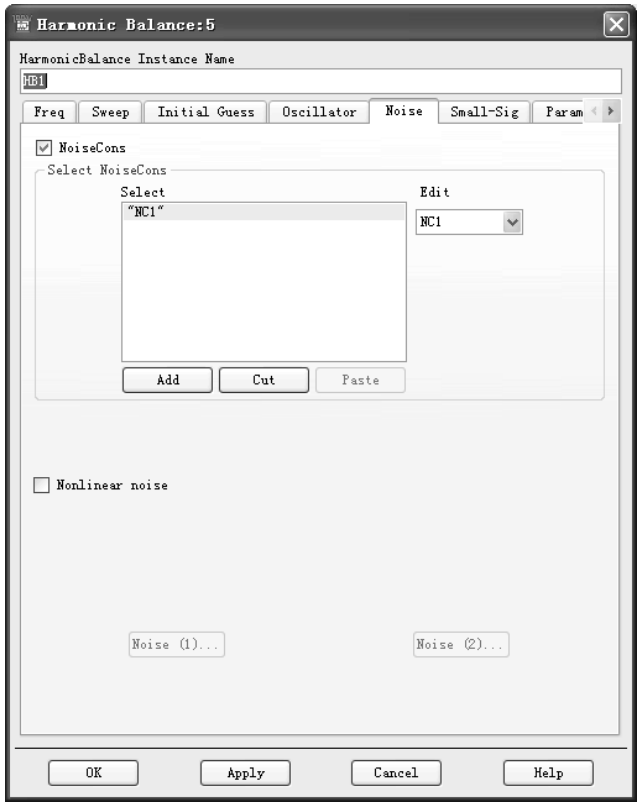


图 3-46　HB 仿真控制器的“Noise”参数设置

（5）在【Display】标签中选择相关参数显示在原理图上，如图 3-47 所示。

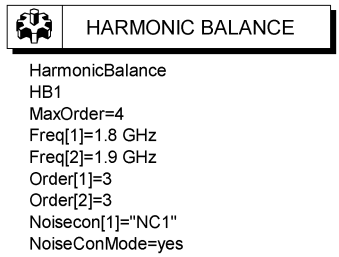


图 3-47　设置后的 HB 仿真控制器

（6）完整的原理图如图 3-48 所示。

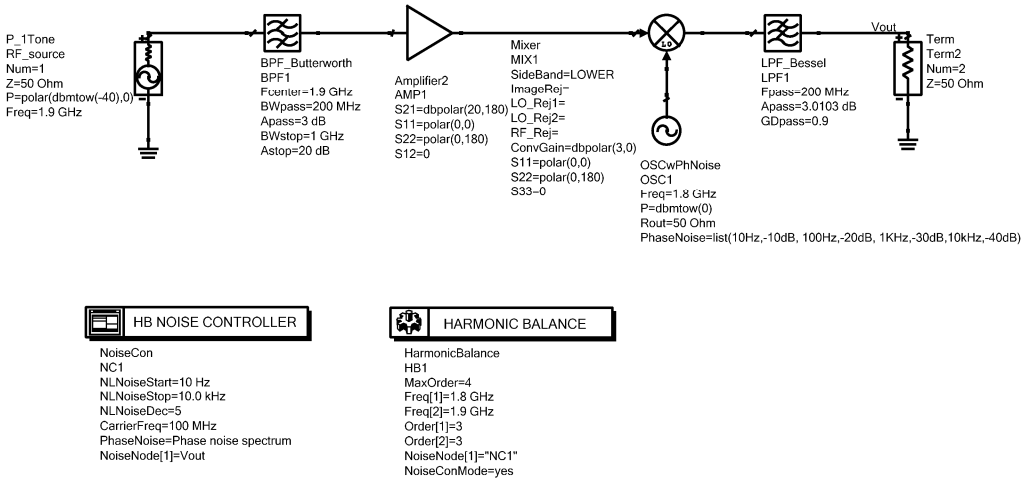


图 3-48　HB 噪声仿真系统原理图

（7）单击仿真按钮，进行仿真。

4．查看仿真结果

（1）在数据显示窗插入矩形图，绘制“pnmx”参数曲线。使用“Plot Options”设定 *x* 轴的单位为 Log。插入一个三角标记观察频偏，如图 3-49 所示。插入矩形图绘制“Vout”，设定单位为 dBm，在中频信号 100MHz 处放置标记。输入功率为-40dBm，加上 22.313dB 的功放增益和混频器转换增益，输出为图 3-50 所示的-17.687dBm。

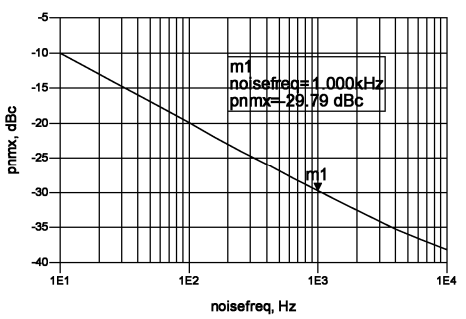


图 3-49　pnmx 仿真曲线

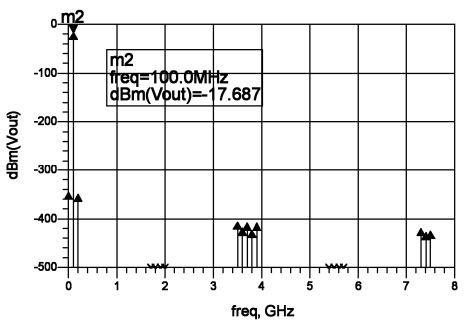


图 3-50　Vout 功率谱仿真结果

（2）保存结果，完成 RF 接收器系统的设计及仿真。

3.3　思考题

（1）在低通滤波器的 S 参数仿真中，在数据显示窗口，试写出 S21 的相位方程

Eqn lpf_phase=phase(S(2,1))

并作图。

（2）在谐波平衡 HBtest 仿真中，把谐波平衡仿真器的谐波次数增为 7，重新进行仿真，并注意仿真结果。再把基频信号频率改为 940MHz，查看仿真结果。试分析仿真结果是否正确。

（3）对（2）在数据显示窗口写另一个方程 Gain_fund=Vout[1] / Vin[1]，括号中 1 的意义是什么？

（4）回到巴特沃思滤波器，用一个椭圆函数滤波器模型代替它进行仿真。尝试设计不同范围的波纹值或用调谐器调节波纹参数。显示结果并观察通带的纹波。为完成工作，尝试使用数据显示命令中的 Zoom 命令（图像放大/缩小）。

第4章　直流仿真

直流仿真用来测试所设计电路的直流工作点特性。直流仿真是所有模拟仿真、射频仿真的基础，可以检测电路的拓扑结构、功耗等。本章主要介绍 ADS2012 直流仿真的基本功能和基本原理，并通过实例介绍直流仿真建立、执行和数据生成等相关内容。



4.1　直流仿真基本原理及功能

直流仿真是整个仿真的开始点，在执行交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡法仿真和电路包络仿真前，单点的直流仿真会自动执行。对于交流仿真和 S 参数仿真，直流仿真用来确定非线性元件的线性模型。对于瞬态仿真、谐波平衡仿真和电路包络仿真，直流仿真用来对其非线性参数做初步估算。

在 ADS 中用户可以通过手工添加直流仿真控制器的方式来执行直流仿真。打开用户创建的设计，添加相关的电流节点，该节点处的相关数据就会被收集。直流仿真还提供了多点和多参数扫描分析。扫描的参数既可以是电压源或电流源的值，也可以是电路中其他参数的值。通过执行直流偏置扫描或扫描变量仿真，用户可以把扫描参数和电路工作点参数相比照，如偏置电压或温度等。

各种模拟器（DC、AC、S 参数、瞬态、谐波平衡、电路包络）把常规的微分方程转换成代数方程，并且使用不同的数值方法求解代数方程。例如，直流仿真和谐波平衡法仿真器处理 d/dt 的操作是不同的，结果得到不同的代数方程。数值模拟技术依赖各迭代过程来实现对电路的一个非线性代数方程平衡点的数学描述。一旦这个平衡点落在一定的误差范围内，就可以找到一个解决办法。

直流电压或电流可以看作频率为零的信号，直流仿真也正是应用了这个概念，一旦下面的条件满足，它可以利用一组非线性微分方程求解描述电路的线性/非线性代数方程的一个平衡点：

- ☺ 独立源是常数值;
- ☺ 线性元件用其在频率为零时的电导值来代替;
- ☺ 电容、微波传输带缺口、交流耦合线和类似的元件用开路来代替;
- ☺ 电感、不连续导体和类似的元件用短路来代替;
- ☺ 时间导数是常数（0）;
- ☺ 传输线根据其长度、截面积、电导率计算出它的直流电导值来代替;
- ☺ S 参数文件必须包含频率为零时的相关参数，否则模拟器会使用 DC 响应的实部计算每一个零频时的 S 参数值;
- ☺ 针对一些 DC 孤立的节点（没有直流路径接地点），模拟器有内建保护措施，但尽量避免这种情况。

对电路进行直流仿真可以实现以下功能：

☺ 验证所测试设计的正确 DC 特性；

☺ 确定电路的功耗；

☺ 将模型的 DC 传输特性曲线（I-V 曲线）与实际测量值相比较，验证模型参数；

☺ 仿真结束后显示电压和电流；

☺ 为 DC 的反向注释提供数据。

4.2　直流仿真面板与仿真控制器

ADS2012 中有专门针对直流仿真的元件面板，如图 4-1 所示，其中列出了直流仿真中可能用到的仿真控件。下面针对各个直流仿真控件详细介绍。

DC：直流仿真控制器　　Options：直流仿真设置控制器

Sweep Plan：参数扫描计划控制器　　Prm Swp：参数扫描控制器

NdSet：节点设置控件　　NdSet Name：节点名控件

Disp Temp：显示模板控件　　Meas Eqn：仿真测量等式控件

【直流仿真控制器】直流仿真控制器（DC）主要完成仿真扫描参数和参数扫描范围等相关参数的设定。

☺ Sweep：直流仿真是在一定初始值范围内执行的，Sweep 参数设置主要就是设置这个范围，用户可以在直流仿真控制器设置窗口中的“Sweep”选项卡中进行设置，如图 4-2 所示。各参数的含义如表 4-1 所示。

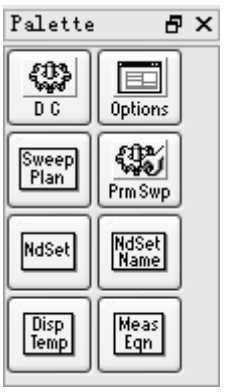


图 4-1　直流仿真面板

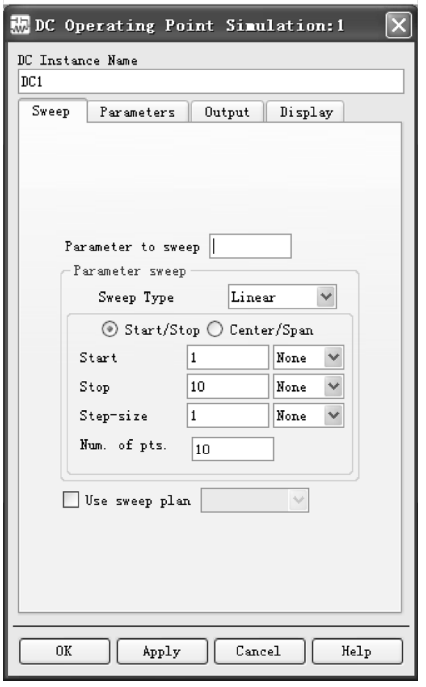


图 4-2　扫描选项卡

表 4-1　直流仿真控制器频率相关参数设定

参 数 名 称		参 数 描 述	说　　明
Parameter to sweep		需要扫描的变量名称	必须是原理图中包含的变量名称
Sweep Type		变量扫描类型	Linear：对变量进行线性扫描 Single Point：单点变量仿真 Log：对变量进行对数扫描
Start/Stop	Start	扫描参数的起始值	扫描范围设定为 Start/Stop
	Stop	扫描的终止值	
Center/Span	Center	扫描中心值	扫描范围设定为 Center/Span
	Span	扫描的范围	
Step-size		扫描间隔	扫描类型设定为 Linear 有效
Num. of pts.		扫描点数	系统自动生成
Pts./decade		每增加 10 倍，扫描的点数	扫描类型设定为 Log 有效
Use sweep plan		是否使用扫描计划	若使用，则要添加“Sweep Plan”控件，并在控件中进行相应设置

☺ Parameters：仿真参量选项卡如图 4-3 所示，表 4-2 给出了相关参数的说明。

表 4-2　Parameters 相关参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Status level	设置仿真状态窗口中信息显示的多少	0：表示显示很少的仿真信息 1 和 2：表示显示正常的仿真信息 3 和 4：表示显示较多的仿真信息
Device operating point level	数据文件中保存原理图里有源器件和部分线性器件的操作点情况	None：不保存 Brief：保存部分元件的电流、功率和一些线性器件的参数 Detailed：保存所有直流仿真工作点的值
Output solutions	数据文件中仿真结果的保存情况	若选中该项，则在仿真数据文件中会保存详细的仿真结果

单击仿真选项卡上的Advanced...按钮，弹出如图 4-4 所示的高级参数设置选项卡。表 4-3 给出了相关参数的说明。



图 4-3　仿真参量选项卡

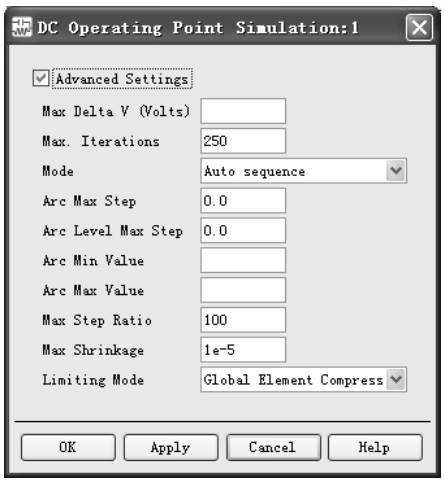


图 4-4　高级参数设置选项卡

表 4-3　高级参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Max Delta V （Volts）	每次重复时节点电压的最大改变值	如果没有指定值，则默认值是电阻热噪声的 4 倍，大致为 0.1V
Max. Iterations	仿真执行的最大重复数	仿真会在仿真结果收敛、出现错误或者达到最大执行重复数时停止
Mode	收敛算法模式选择	仅在直流仿真模式下起作用
Arc Max Step	arc-length 增量/减量的最大间隔	默认值 0，表示没有最大间隔限制
Arc Level Max Step	源级 arc-length 增量/减量的最大间隔	默认值 0，表示没有最大间隔限制
Arc Min Value	arc-length 最小允许值	无
Arc Max Value	arc-length 最大允许值	无
Max Step Ratio	最大间隔数	默认 100
Max Shrinkage	arc-length 增量/减量的最大间隔	默认值为 1e-5
Limiting Mode	设置每次重复时节点值变化的限制	可以选择六种限制模式： Global Element Compression、Global Device-based Limiting、Dynamic Element Compression、Dynamic Vector Compression、Global Vector Scaling、No Limiting

☺ Output：输出参数选项卡如图 4-5 所示，表 4-4 给出了相关参数的说明。其中“Maximum Depth”是保存数据的层级。

表 4-4　输出参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Node Voltages	节点电压	保存该节点的数据
Measurement Equations	测量方程	保存测量和 VAR 方程的数据
Branch Currents	支路电流	保存支路电流的数据
Pin Currents	引脚电流	保存引脚电流的数据。保存的类型可以选择为 All、Linear 和 Nonlinear
Save by name	保存名称	识别用户要保存的单个节点、方程和引脚名字的数据
Add/Remove	添加/删除	添加/删除节点名、方程名和引脚名

☺ Display：参数显示选项卡如图 4-6 所示，用户可以通过选中相应参数前的小方块来定义显示参数。

【直流仿真设置控制器】直流仿真设置控制器（Options）参数设置包括“Misc”、“Convergence”、“Output”、“DC Solutions”、“Threading”和“Display”六项内容，主要用来设置仿真的外部环境和计算方式，如环境温度、设备温度、仿真收敛性、仿真状态提示和输出文件特性等相关内容。直流仿真设置控制器如图 4-7 所示。具体参数描述及说明请读者查阅相关资料。

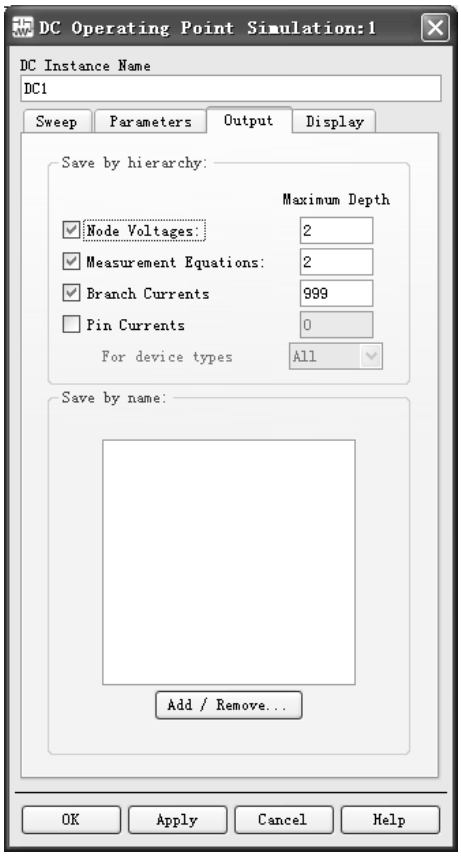
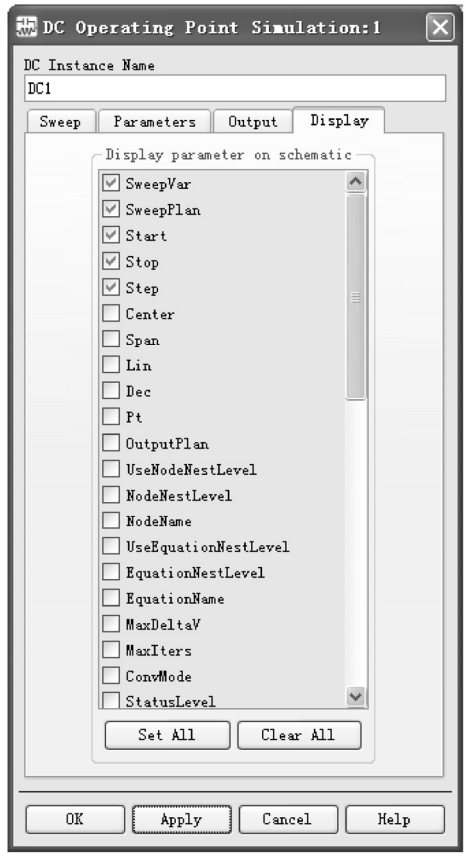


图 4-5　输出参数选项卡



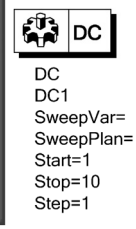


图 4-6　参数显示选项卡及直流仿真控制器

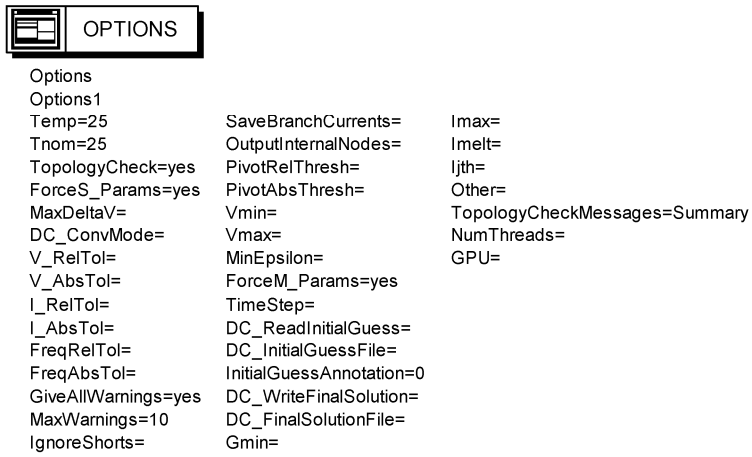


图 4-7　直流仿真设置控制器

【参数扫描计划控制器】参数扫描计划控制器（Sweep Plan）用来控制仿真中的参数扫描计划。用户可以通过该控制器添加一个或多个扫描变量，如图 4-8 所示，同时可以制订相应的扫描计划。

【参数扫描控制器】参数扫描控制器（Prm Swp）如图 4-9 所示，可以完成控制仿真中

扫描参数的设置，该控制器可以对多个仿真参数进行扫描。

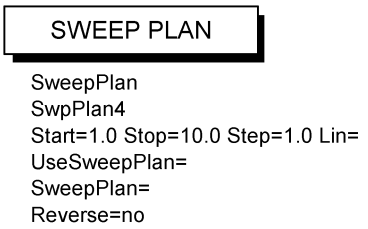


图 4-8　参数扫描计划控制器

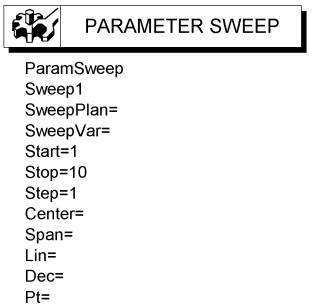


图 4-9　参数扫描控制器

【节点设置控件】节点设置控件（NdSet）如图 4-10 所示，可以完成直流仿真相关节点的设置，并且可以设置插入节点处的参考电压和电阻。

【节点名控件】节点名控件（NdSet Name）如图 4-11 所示，可以设置直流仿真相关节点的名称，也可以设置插入节点处的参考电压和电阻。

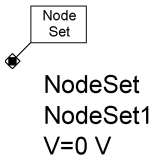


图 4-10　节点设置控件

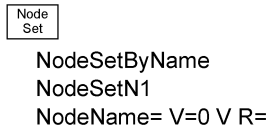


图 4-11　节点名控件

【显示模板控件】显示模板控件（Disp Temp）如图 4-12 所示，可以用来设置显示模板。用户可以通过载入相应的显示模板来实现仿真数据的显示方式。

【仿真测量等式控件】 仿真测量等式控件（Meas Eqn）如图 4-13 所示，可以用来添加一个或多个仿真测量等式，在仿真结束后，这个等式的结果将包含在仿真结果的数据中。



图 4-12　显示模板控件

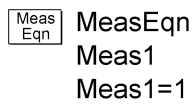


图 4-13　仿真测量等式控件

4.3　直流仿真的一般过程

（1）选择器件模型建立电路原理图。

（2）在“Simulation-DC”元件面板列表中选择直流仿真控制器 DC，并放置在原电路图设计窗口中。

（3）双击 DC 直流仿真控制器，在“Sweep”选项卡中对直流仿真中扫描类型和扫描范围等进行设置。

（4）如果扫描变量较多，则需要在“Simulation-DC”元件面板中选择“Prm Swp”控件，在其中设置多个扫描变量以及每个扫描变量的扫描类型和扫描参数范围等。

（5）设置完成后，执行仿真。

（6）在数据显示窗口中查看仿真结果。

4.4 ADS 中直流仿真案例

ADS2012 中自带两个案例，通过这两个案例读者可以了解如何创立和运行直流仿真的过程，这两个案例为：

☺ BJT 仿真：单点直流仿真；

☺ 带参数扫描的直流仿真：一个或多个参数直流仿真。

4.4.1 BJT 仿真

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，选择“Tutorial/SimModels_wrk.7zads”工程，双击打开该工程，如图 4-14 所示。这个项目空间中含有常见的仿真案例，如交、直流仿真，HB 仿真等。

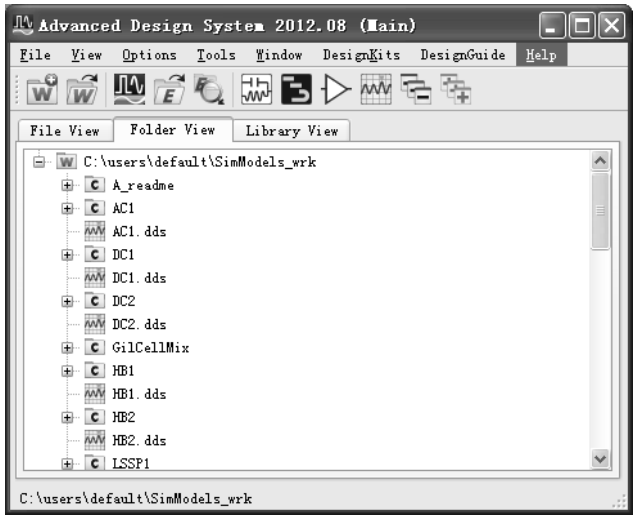


图 4-14 工程文件

（3）在工程“Folder View”选项卡目录中选择设计 DC1，单击该文件夹，打开 schematic，如图 4-15 所示。

（4）单击菜单栏【Simulate】→【simulate】命令或仿真按钮，得到如图 4-16 所示数据。该数据以列表的形式给出，其中三极管基极电压为 678.8mV，集电极电压为 3.000V，即将三极管看作一个反相器，可以看成输入/输出电压极性相反。

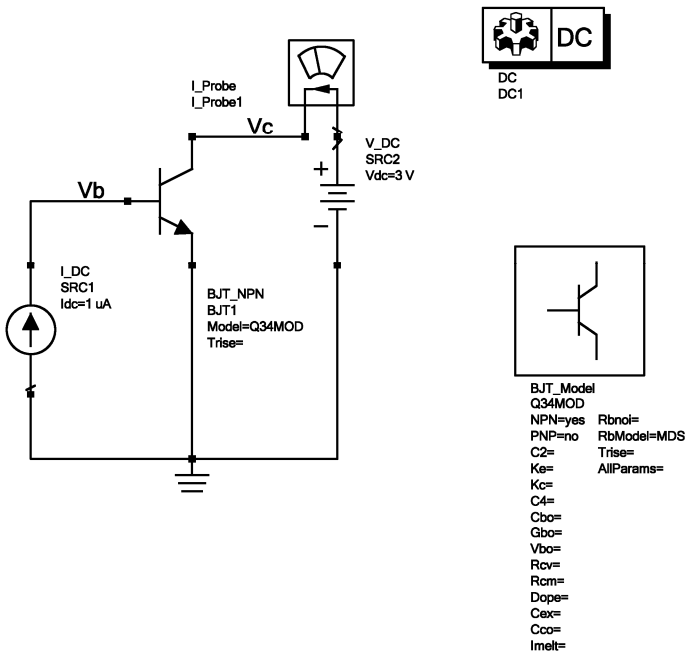


图 4–15　DC1 电路原理图

freq	DC1..Vc	DC1..Vb	DC1..I_Probe1.i
0.0000 Hz	3.000 V	678.8 mV	61.02 uA

图 4–16　DC1 仿真结果

（5）在原理图设计窗口，单击菜单栏【Simulate】→【Annotate DC Solution】命令，可以看到电路图中各个节点标出了当前的电压或电流值，如图 4–17 所示。

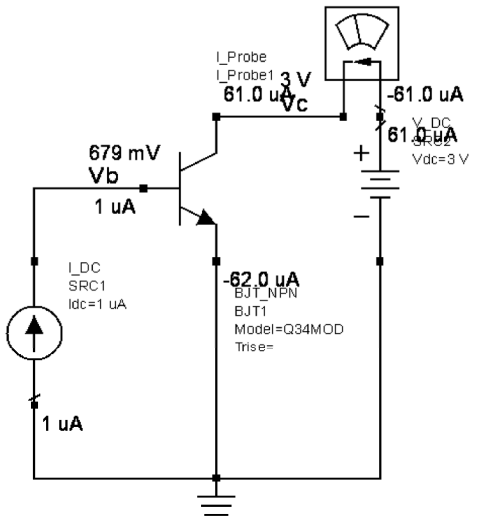


图 4–17　在电路原理图中显示电压或电流值

4.4.2 带参数扫描的直流仿真

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，选择“Tutorial/SimModels_wrk.7zads”工程，双击打开该工程，如图 4-14 所示。

（3）在工程“Folder View”选项卡目录中选择设计 DC2，单击该文件夹，打开 schematic，如图 4-18 所示。

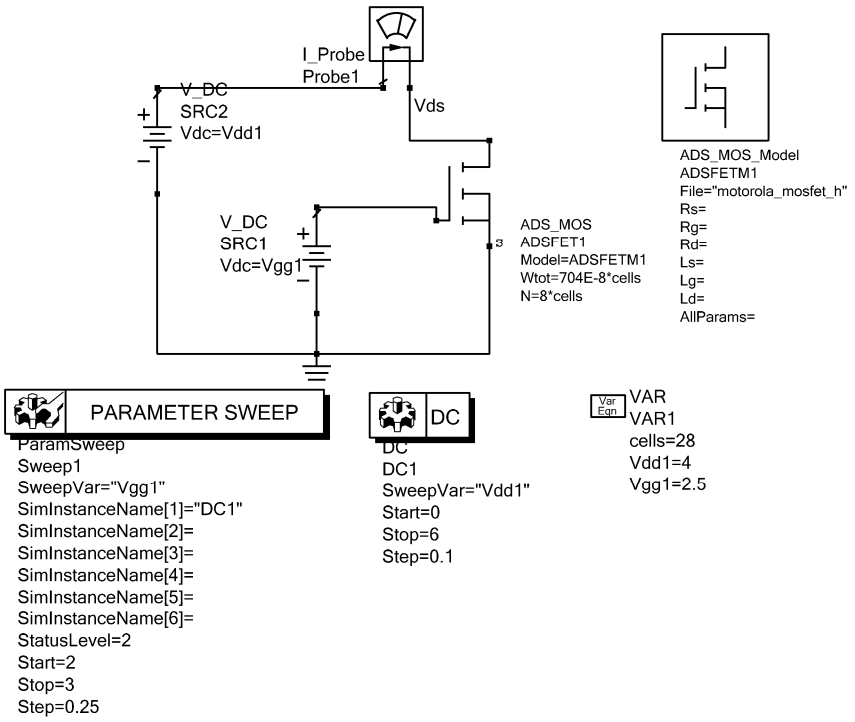


图 4-18 DC2 原理图

（4）在原理图窗口查看 PARAMETER SWEEP 控件的参数设置如下：

☺ SweepVar=“Vgg1”，表示 Vgg1 为一个扫描变量。

☺ SimInstanceName[1]=“DC1”，参数扫描仿真实例名为“DC1”的直流仿真器。

☺ Start=2，Vgg1 参数扫描的起始值为 2。

☺ Stop=3，Vgg1 参数扫描的终值为 3。

☺ Step=0.25，Vgg1 参数扫描间隔为 0.25。

（5）直流仿真器 DC 参数设置如下：

☺ SweepVar=“Vdd1”，Vdd1 为另一个扫描变量。

☺ Start=0，Vdd1 参数扫描起始值为 0。

☺ Stop=6，Vdd1 参数扫描终值为 6。

☺ Step=0.1，Vdd1 参数扫描间隔为 0.1。

（6）变量控件 VAR 中的参数设置如下：

☺ cells=28，变量 cells 的默认值为 28。

☺ Vdd1=4，变量 Vgg1 的默认值为 4。

☺ Vgg1=2.5，变量 Vgg1 的默认值为 2.5。

（7）单击菜单栏【Simulate】→【simulate】命令或仿真按钮，得到如图 4-19 所示的参数扫描曲线。

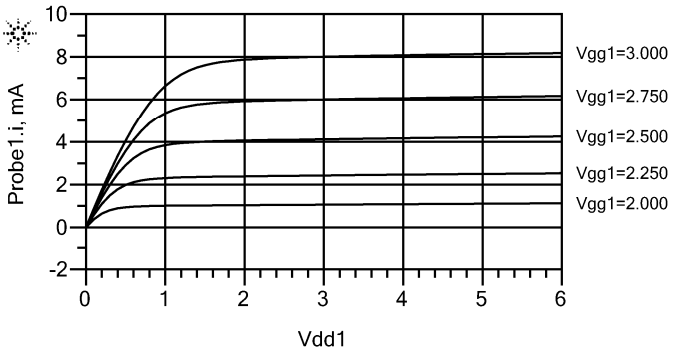


图 4-19　参数扫描曲线

4.5　直流仿真实例

DC 仿真器是所有仿真器当中最基本也是最重要的模拟器，本节通过实例介绍如何使用 DC 仿真器，以及常用直流参量的求解方法。本节主要完成对含有寄生元件的 BJT 电路直流特性的分析。

该案例通过对一个含有寄生元件的 BJT 电路进行直流分析和仿真，全面地了解直流仿真的相关操作，主要任务包括：

☺ 子电路的创建。

☺ DC 特性曲线仿真，采用模板分析及自建偏置网络分析两种方法。

☺ 偏置网络分析。

☺ 温度对直流工作点的影响，即温度扫描分析。

4.5.1　子电路创建方法

子电路作为顶层电路设计的一部分，在电路设计中经常用到，特别涉及建立器件模型时，使用更为普遍。

1．建立原理图

（1）创建新项目空间，命名为 chapter4_wrk。

（2）创建新的原理图窗口，命名为 bjt_pkg。

（3）选择 Devices-BJT 类元件列表，建立 BJT 器件和模型。

（4）在原理图窗口插入通用的 BJT 和 BJT_model，如图 4-20 所示。

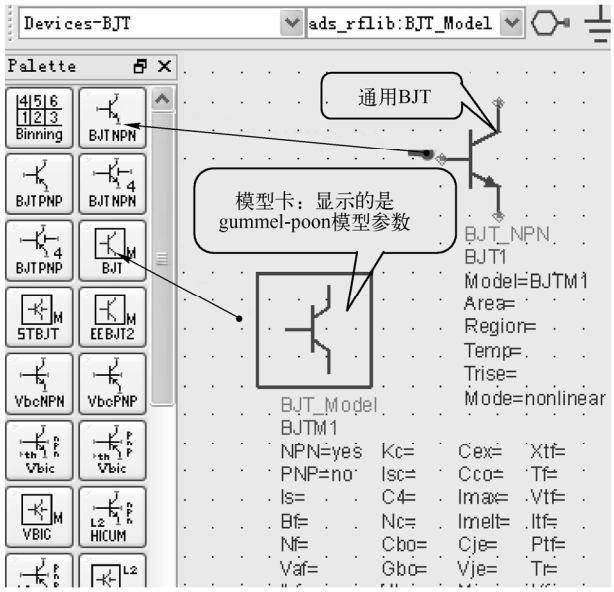


图 4–20　插入 BJT 及其模型

> 器件的例化名（BJTM1）必须与 BJT_NPN Model=BJTM1 相匹配。

（5）双击晶体管模型，弹出对话框，如图 4–21 所示，单击 Component Options... 按钮，弹出另外一个对话框，单击“Clear All”项，然后单击 OK 按钮。这时原理图中模型所有的参数不再显示。

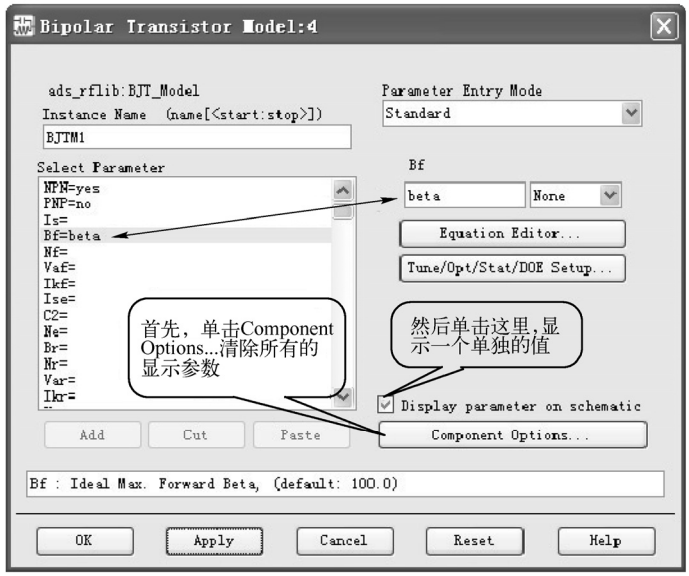


图 4–21　模型参数设置图

（6）在 BJT_Model 参数设置对话框中对模型参数进行设置。选择参数 Bf，设置其值为 beta。并选中选项“Display parameter on schematic”，单击 Apply 按钮确认。此时 beta 已经成为电路的一个参数。

（7）设置 Vaf（预置电压）=50，同时选中 “Display parameter on schematic”，单击 Apply 按钮确认。

（8）设置 Ise=0.02e−12（基极−射极之间的漏电流），同时选中 “Display parameter on schematic”，单击 Apply 按钮确认。

（9）单击 OK 按钮退出对话框设置窗口。

（10）按照同样的方法，可以去掉 BJT 器件或其他器件一些不希望显示的参数，如面积、区域、模式和温度等，如图 4−22 所示。



图 4−22　器件参数设置

2．创建子电路

（1）插入寄生元件 L 和 C。插入三个引线电感（320pH）和 2 个结电容（120fF），请注意电感和电容的单位，并将三极管基极电感的 R 参数设置为 0.01Ω。

（2）插入引脚连接器。单击工具栏 图标或单击菜单栏【Insert】→【Port】命令，按顺序放置引脚连接器：P1 集电极（C）、P2 基极（B）、P3 发射极（E）。

（3）整理原理图。将元件摆放有序，并移动各个元件的文本框，然后按照图 4−23 所示的方式连接起来。

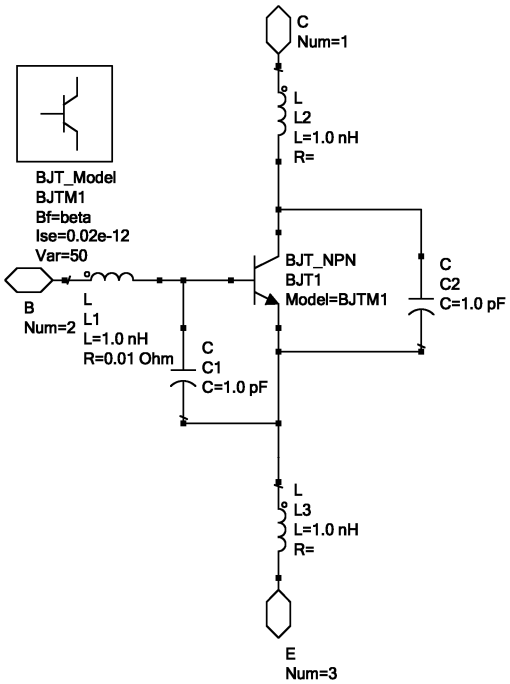


图 4−23　含有寄生元件的原理图

（4）在原理图窗口选择【File】→【Design Parameters…】，打开对话框中的“General Cell Definition”选项卡，对参数进行修改，如图 4-24 所示。

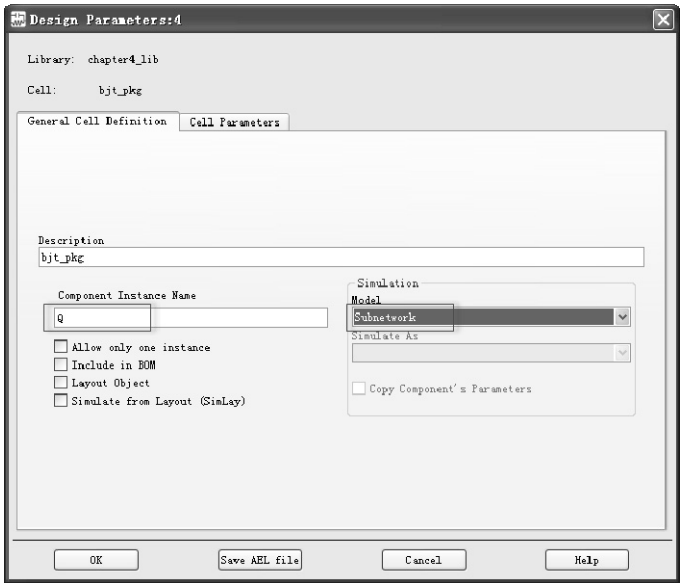


图 4-24　内建符号设置

☺ 在“Component Instance Name”框中改变元件范例名为 Q;

☺ 在“Model”框中选择 Subnetwork。

（5）单击“Cell Parameters”选项卡，设置 beta 参数。在“Parameter Name”框中输入 beta，“Default Value”框中输入 100，单击 Add 按钮，将参数添加到内建模型中去。最后选中“Display parameter on schematic”复选框，单击 OK 按钮，保存新的设置，并关闭对话框，如图 4-25 所示。

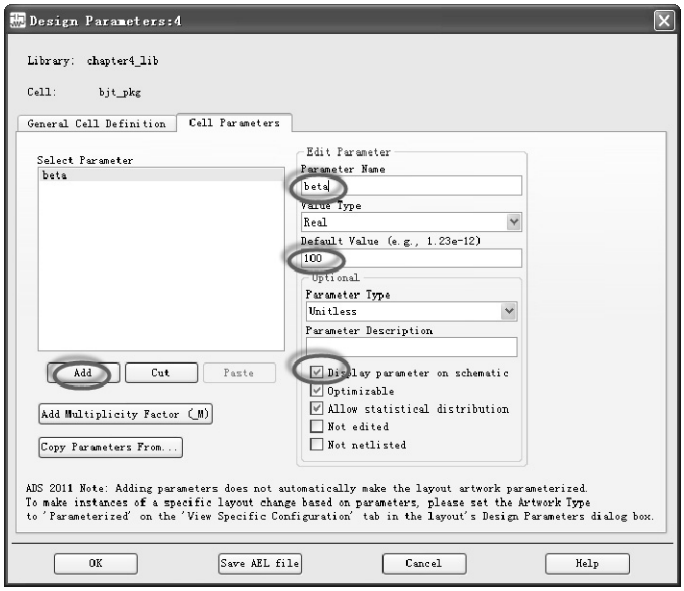


图 4-25　符号添加参数

（6）最后保存原理图，电路符号创建完毕。

该电路符号可以在后面的设计中直接调用。下面的例子就会说明这个问题。

4.5.2　直流特性分析

直流特性分析包括输入阻抗、输出阻抗、静态工作点等，接下来的案例主要说明的是当三极管的放大倍数改变时，V–I 特性曲线的变化情况。

1．子电路调用

（1）在当前项目下，新建原理图命名为 dc_curves。

（2）选择菜单【Insert】→【Component】→【Component Library】或单击工具栏图标，出现对话框，如图 4–26 所示。

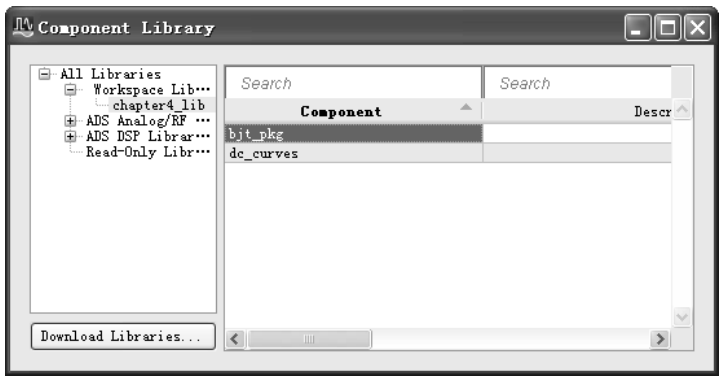


图 4–26　添加自制电路元件对话框

（3）单击该项目下的 bjt_pkg 拖入原理图中，这时弹出“Generate Symbol”对话框，如图 4–27 所示。

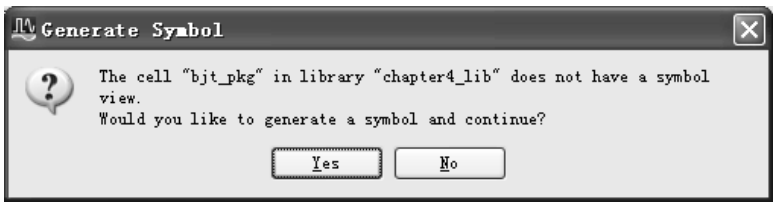


图 4–27　“Generate Symbol”对话框

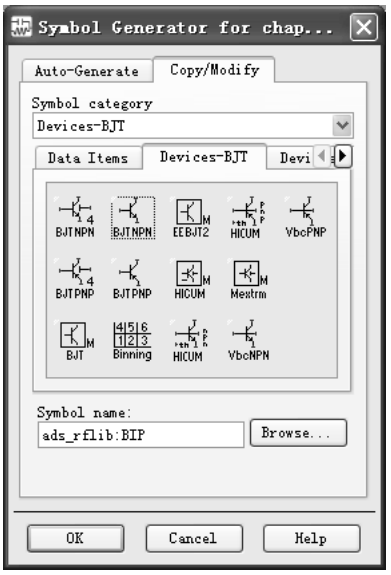
（4）单击 Yes 按钮，弹出“Symbol Generator…”对话框，因为上面新建的就是 BJT 模型，所以选择“Devices-BJT”选项卡，单击 BJTNPN 符号，如图 4–28 所示。

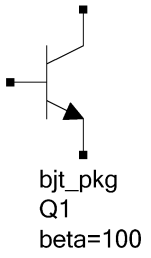
（5）单击 OK 按钮，如图 4–29 所示，将一个新的器件放置到原理图中。选中该器件，可以查看其子电路；单击工具栏按钮，可以查看它的内部电路；单击按钮，返回顶层电路。

2．模板的使用方法

（1）选择菜单栏【Insert】→【Template】，打开插入模板对话框，选中 BJT_curve_

tracer，如图 4-30 所示。





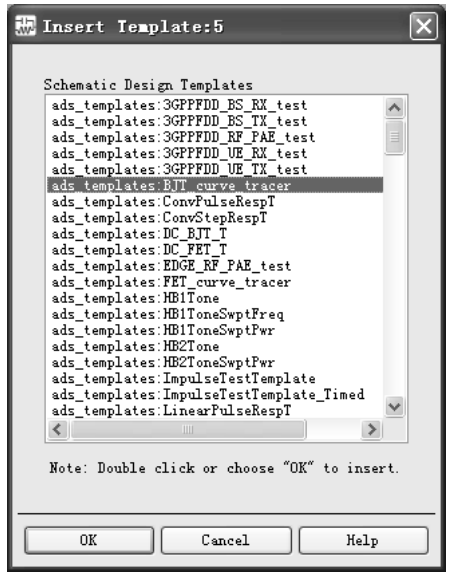


图 4-28　器件符号选择对话框　　图 4-29　新生成的 NPN 三极管　　图 4-30　插入模板对话框

（2）单击 OK 按钮，得到直流仿真模板，如图 4-31 所示。

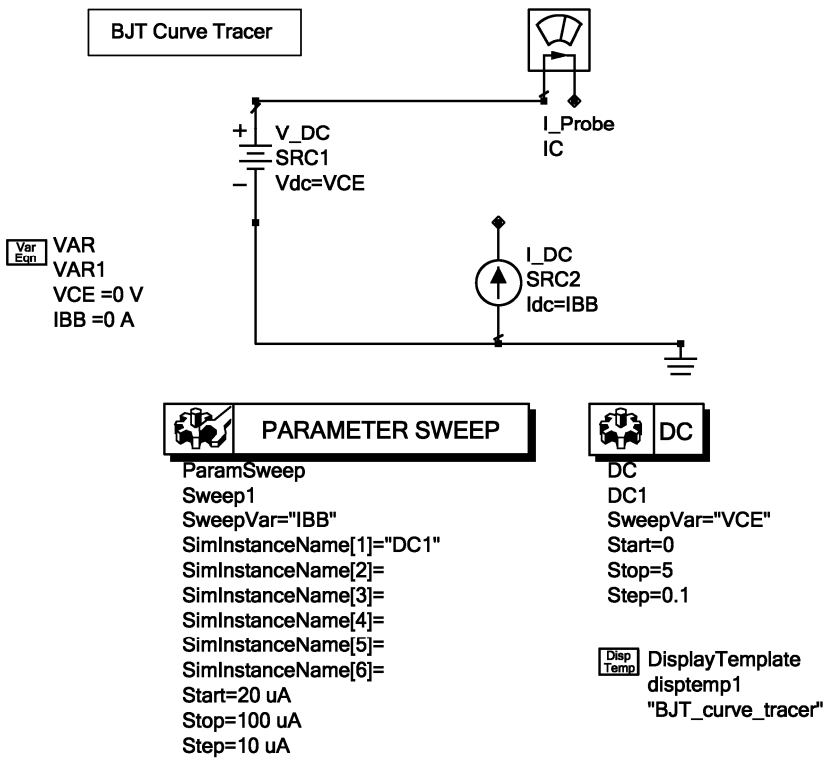


图 4-31　直流仿真模板

（3）直接将待测三极管接上运行仿真即可，如图 4-32 所示。

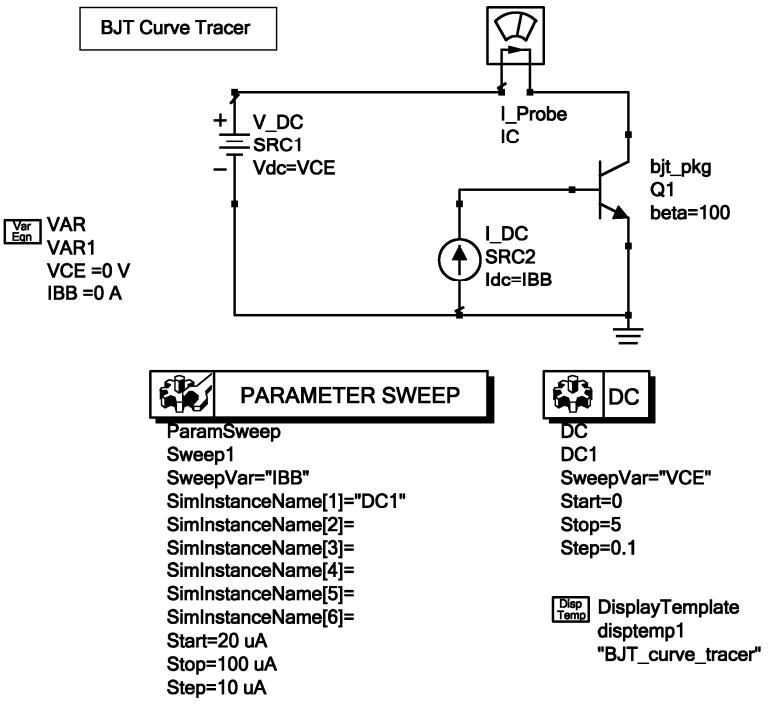


图 4–32　直流仿真测试电路

（4）运行仿真，单击仿真按钮，直接得到仿真结果，如图 4–33 所示。

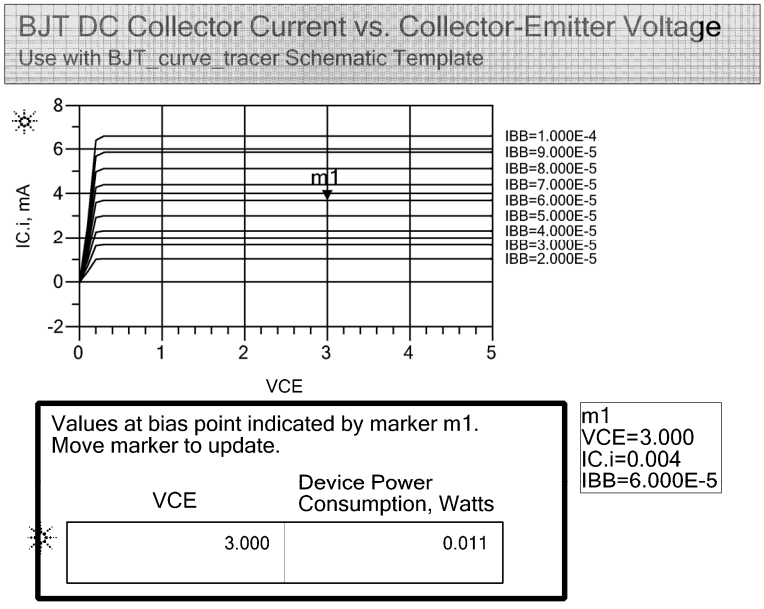


图 4–33　仿真结果

4.5.3　偏置网络分析

偏置网络是指由电阻构成的分压分流电路，这里指的是电阻 R1 和 R2 构成的小网络。

1．新建原理图

（1）在当前项目下，新建原理图命名为 bias_net。

（2）在当前的项目下，调用三极管电路，设置 beta=160。

（3）选择“Sources-Freq Domain”类元件面板，添加电压源 V_DC 和电流源 I_DC。

（4）选择“Probe Component”类元件面板，添加电流探测器 I_Probe，按图 4-34 所示连接好电路。

2．参数设置

（1）单击工具栏 NAME 快捷键，弹出对话框，如图 4-35 所示，在“Wire/Pin Label”栏输入 VBE，将鼠标移至三极管的基极，给基极添加节点“VBE”，仿真之后将该点的电压值保存在仿真数据里。

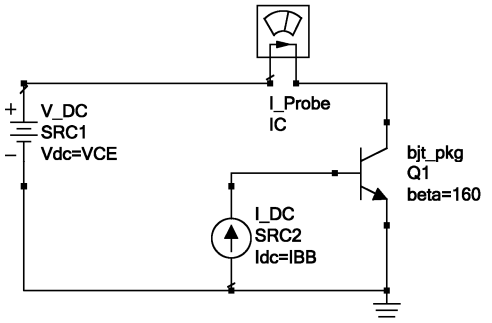


图 4-34　连接好电路

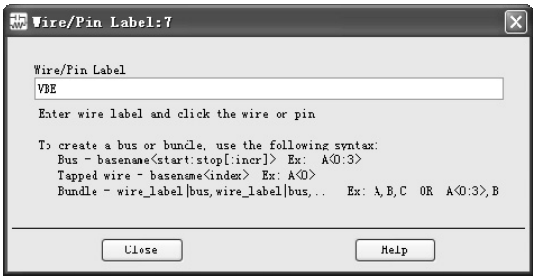


图 4-35　添加节点名

（2）电流源 Idc 设置为变量“IBB”。

（3）单击工具栏 0110 VAR 快捷键，定义变量控件，添加变量“IBB”，初始值为 0A。

（4）选择“Simulation-DC”类元件面板，添加 DC 仿真控制器，单击 DC 仿真控制器的属性对话框，在“Sweep”选项卡中，设置 Parameter to sweep IBB 。无须添加 PARAMETER SWEEP 控件，因为基极的静态工作点的值已经确定，即只需扫描一个参数。

（5）修改电路参数，设置扫描开始为 10μA，结束为 100μA，步进为 10μA，为了便于观察，可以把设置好的这些参数显示出来，Vdc=3V，如图 4-36 所示。

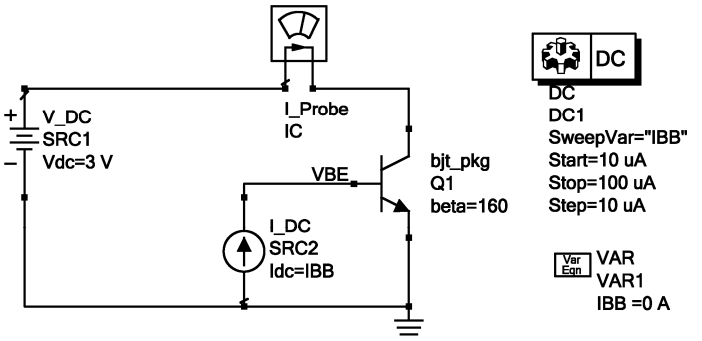


图 4-36　直流仿真原理图

3．仿真

单击仿真按钮，仿真结束后，单击数据显示窗口控制面板的1234 5678按钮，以数值（list）方式显示结果，由于扫描参数为 IBB，所以 IBB 自动添加，扫描范围为 10～100μA。另外，还需要添加 IC.i 和 VBE 两个参数，列表数据如图 4–37 所示。

IBB	IC.i	VBE
1.000E-5	565.4 uA	754.8 mV
2.000E-5	1.348 mA	777.1 mV
3.000E-5	2.214 mA	789.9 mV
4.000E-5	3.134 mA	798.8 mV
5.000E-5	4.092 mA	805.7 mV
6.000E-5	5.079 mA	811.3 mV
7.000E-5	6.091 mA	815.9 mV
8.000E-5	7.122 mA	819.9 mV
9.000E-5	8.171 mA	823.5 mV
1.000E-4	9.234 mA	826.6 mV

图 4–37　VBE 和 IC.i 的数据列表

4．偏置网络计算和验证

（1）设静态工作点为 VCE=3V，IC.i=3.325mA，就可以计算偏置网络的参数。偏置网络电路如图 4–38 所示，总的偏置电压为 5V，VCE=3V，IC.i=3.325mA，即计算 Rc 和 Rb。

（2）打开 bias_net 仿真的数据显示窗口，单击Eqn按钮，弹出对话框，在“Enter equation here”栏下输入公式，如 Rb = (VCE – VBE)/IBB，Rc = (V_DC – VCE)/IC.i，让软件自动计算 Rb 和 Rc，输入的公式和计算结果如图 4–39 所示。

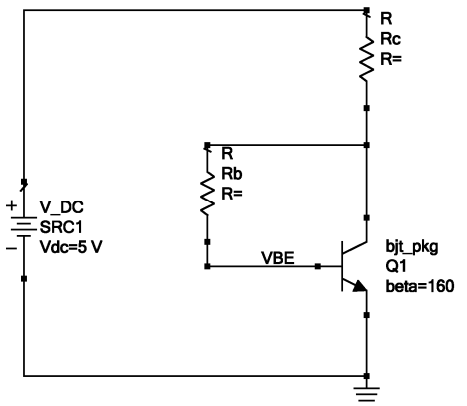


图 4–38　带有直流偏置网络的电路原理图

Eqn Rb=(3-VBE)/IBB　Eqn Rc=(5-3)/Ic.i

IBB	Rb	Rc
1.000E-5	224518.366	3334.233
2.000E-5	111142.833	1398.882
3.000E-5	73669.698	851.344
4.000E-5	55029.027	601.500
5.000E-5	43886.103	460.687
6.000E-5	36479.132	371.123
7.000E-5	31201.140	309.494
8.000E-5	27250.726	264.671
9.000E-5	24183.637	230.704
1.000E-4	21733.818	204.133

图 4–39　Rb 和 Rc 数据表

（3）随着 IBB 的不同，得到不同的 Rb 和 Rc，根据图 4–39 得知，Rb=55 029.027，选择标称电阻为 56kΩ，Rc=601.500，选择标称电阻为 590Ω。这样与静态工作点相对应的偏置电路参数计算完成，得到如图 4–40 所示的原理图，命名为 bias_netcomputer。

（4）验证静态工作点，按上面求出的参数标定，运行 DC 仿真，通过工具栏的“Simulate/Annotate DC Solution”功能观察节点的标定结果。其中 VCE=3.08V，IC.i=3.25mA，如图 4–41 所示，说明与理论计算较接近，结论正确。

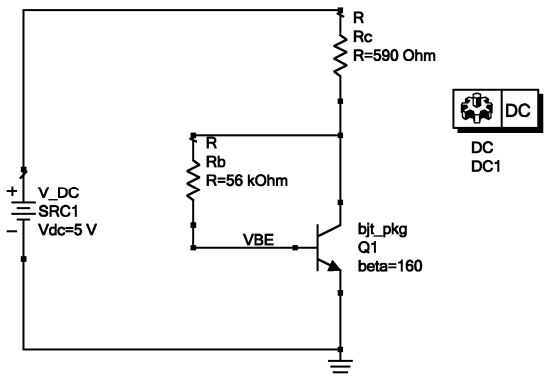


图 4-40　偏置电路原理图

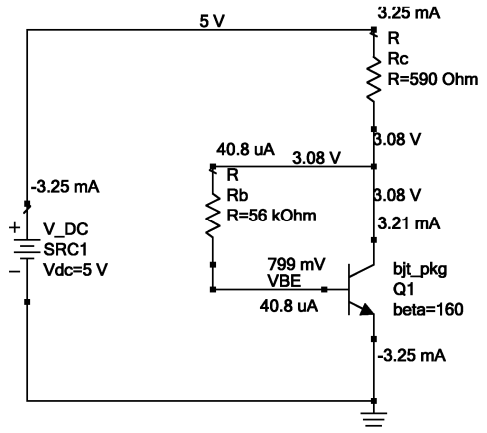


图 4-41　验证静态工作点

4.5.4　温度扫描

当环境温度或器件本身的温度变化时，非线性器件的参数也会发生变化，会导致支流工作点的偏移。温度扫描可以观察温度变化对直流工作点的影响，下面以具体案例为例详细说明温度扫描步骤。

（1）在工具栏单击【File】→【Save As】项，把 bias_netcomputer 电路图另存为新的电路原理图 tempsweep。

（2）选择“Simulation-DC”元件类面板，添加 DC 仿真控制器，单击 DC 仿真控制器的属性对话框，需要扫描的参数“Parameter to Sweep”为 temp，设置开始扫描为−55，结束为 155，步进为 5。

（3）单击工具栏 NAME 快捷键，弹出对话框，在“Wire/Pin Label”栏输入 VBE，将鼠标移至三极管的集电极，添加节点“VC”，仿真之后将该点的电压值保存在仿真数据里，连接好的电路如图 4-42 所示。

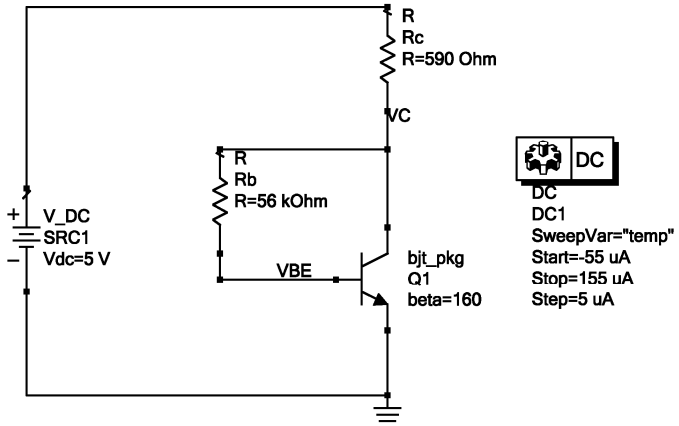


图 4-42　连接好的电路

（4）单击仿真按钮，运行仿真。仿真结束后选择插入矩形图，选择参数 VC，并单击 >>Add Vs...>> 按钮，在弹出的对话框中选择 temp，如图 4-43 所示。

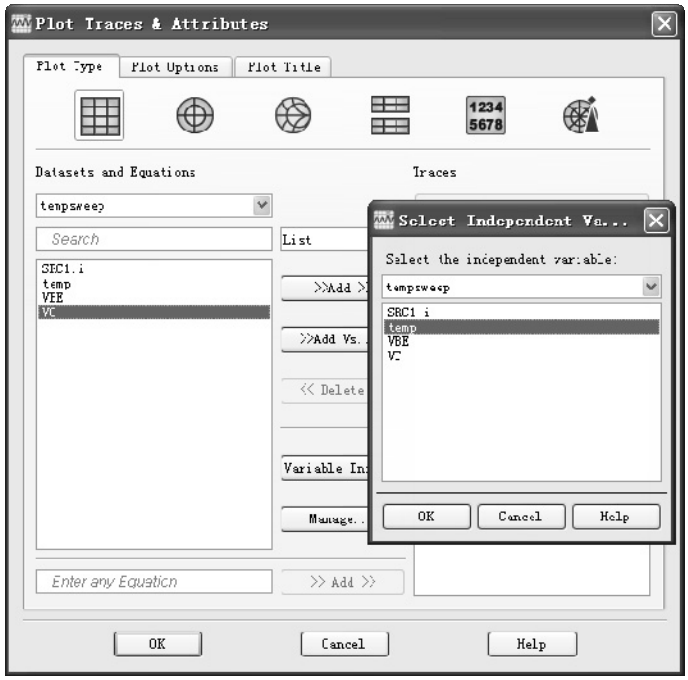


图 4-43　温度仿真设置对话框

（5）单击 OK 按钮两次，得到 VC 与 temp 的关系曲线，如图 4-44 所示。

（6）同样方法，可以得到 VBE 与 temp 的关系曲线，如图 4-45 所示。

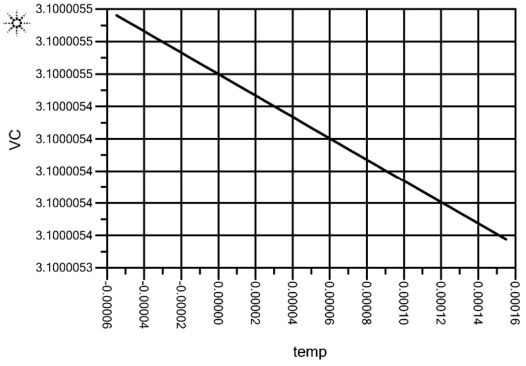


图 4-44　VC 与 temp 的关系曲线

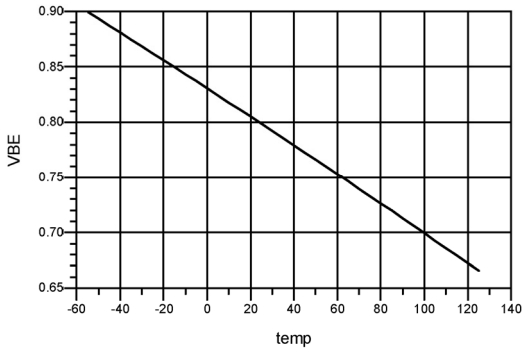


图 4-45　VBE 与 temp 的关系曲线

4.6　思考题

（1）在 bjt_pkg 原理图设计中使用 SP_NWA_T 模板进行仿真。

（2）用探头（probe）绘制电流（IC.i）随温度变化的曲线。试着设置一个温度的传递参数（选项控制器中 temp=25）。

（3）用另一个模型（Mextram）代替 Gummel-Poon 模板卡，并重新仿真。完成仿真以后，比较仿真结果。

第5章 交流仿真

交流仿真在电子线路仿真中十分重要，可以用来分析电路的小信号特性，也可以分析电路的噪声特性。本章首先介绍 ADS2012 交流仿真的基本功能和基本原理，以及交流仿真的建立、执行、仿真和数据生成等内容，并通过实例介绍交流仿真的执行过程。在无源电路和小信号有源电路设计中，交流仿真是有效的仿真手段之一。



5.1 交流仿真基本原理及功能

当进行交流小信号仿真时，系统首先对电路进行直流分析找到非线性器件的直流工作点，然后将非线性器件在静态工作点附近进行线性化处理，最后分析小信号在静态工作点处的输入、输出关系。

从某种意义上来说，传统的小信号交流分析是线性的，不会出现变频效应。对于射频系统仿真，射频小信号作为激励，通过混频器频率组件实现从射频到中频的变换，这种变换方法近似看作线性变换。为了确保频率变换，可以执行系统级小信号分析，即“标准”交流信号分析。

交流信号频率变换仿真首先要建立频率映射（frequency map）。这种映射的目的是指定一个频率表示电路节点变量，且该网络是基于源的频率和行为级混频器组件的类型来表示的，即网络中的每个节点仅仅与一个频率有关。因此，每个行为级混频器组件能够实现从上边带或下边带的变换，但不能同时实现上、下边带变换。

在交流信号频率变换分析中，可作为源的组件常用的有 V_1Tone、I_1Tone 和 P_1Tone，其中源的频率可以通过源自身所带的频率参数设定，如果使用多频率源，频率通过 Freq[1]参数设定。

使用 ADS 的交流仿真可以实现下述功能：

☺ 执行扫频或扫频变量小信号线性仿真。

☺ 获得小信号传输参数，如电压增益、电流增益、跨导、导纳等。

☺ 噪声分析。交流仿真中还包含噪声分析的功能。噪声分析功能可以将电路中的噪声以电流或者电压的形式保存在仿真结果的数据组中，它在交流仿真中可以设置。

噪声分析中包括的噪声成分有下面几种：

☺ 数据文件指定有损无源元件产生的温度决定的热噪声。

☺ 非线性器件产生的温度和偏压限制噪声。

☺ 由二端口数据文件包括噪声参数指定的线性有源器件产生的噪声。

☺ 噪声源器件产生的噪声。

5.2　仿真面板与仿真控制器

ADS2012 中有专门针对交流仿真的元件面板，在“Simulation-AC”面板中列出了交流仿真需要的控件，如图 5-1 所示。下面针对各个交流仿真控件详细介绍。

AC：交流仿真控制器
Options：交流仿真设置控制器
Sweep Plan：参数扫描计划控制器
Prm Swp：参数扫描控制器
NdSet：节点设置控件
NdSet Name：节点名控件
Disp Temp：显示模板控件
Meas Eqn：仿真测量等式控件
Bdfreq：频率预算控件
BuGain：增益预算控件
BuGmma：反射系数预算控件
BudNF：噪声系数预算控件
BudNFd：噪声系数相位预算控件
BdNPwr：噪声功率预算控件
Bud TN：等效输出噪声温度控件
BudPwrl：入射功率预算控件
BdPwrR：反射功率预算控件
BudSNR：信噪比预算控件
BdVSWR：驻波比运算控件

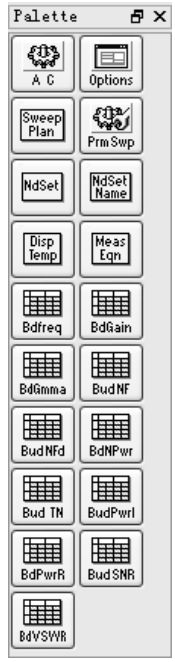


图 5-1　交流仿真面

1．交流仿真控制器

交流仿真控制器（AC）是交流仿真中最主要的控件。使用交流仿真控制器可以设置交流仿真的频率扫描范围、仿真执行参数和噪声分析的相关参数等内容。交流仿真控制器如图 5-2 所示，其中显示了所有的参数项。



AC
AC1

SweepVar="freq"	EquationName[1]=	SavedEquationNestLevel=2
SweepPlan=	CalcNoise=no	SavedEquationName[1]=
Start=1.0 GHz	NoiseNode[1]=	AttachedEquationName[1]=
Stop=10.0 GHz	SortNoise=Off	UseDeviceCurrentNestLevel=no
Step=1.0 GHz	IncludePortNoise=yes	DeviceCurrentNestLevel=0
Center=	NoiseThresh=	DeviceCurrentName[1]=
Span=	BandwidthForNoise=1 Hz	DeviceCurrentDeviceType=All
Lin=	FreqConversion=no	DeviceCurrentSymSyntax=yes
Dec=	UseFiniteDiff=no	UseCurrentNestLevel=yes
OutputPlan[1]=	StatusLevel=2	CurrentNestLevel=999
UseNodeNestLevel=yes	OutputBudgetIV=no	
NodeNestLevel=2	DevOpPtLevel=None	
NodeName[1]=	Freq=	
UseEquationNestLevel=yes	Other=	
EquationNestLevel=2	UseSavedEquationNestLevel=yes	

图 5-2　交流仿真控制器

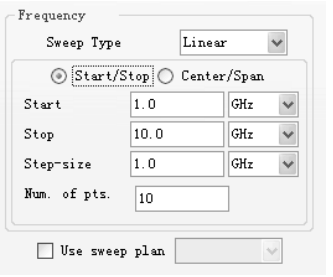


图 5-3　交流仿真的频率参数设置

双击图标，弹出交流仿真控制器选项卡，主要包括“Frequency”、“Noise”、“Parameters”、“Output”、“Display”五项内容。

【Frequency】交流仿真是在一定频率范围内执行的，频率参数设置主要就是设置这个频率范围，用户可以在交流仿真控制器设置窗口中的“Frequency”选项卡中进行设置，如图 5-3 所示。各参数描述见表 5-1。

表 5-1　交流仿真控制器频率相关参数设置

参数名称		参数描述	说　明
Sweep Type		频率扫描类型	Linear：对频率进行线性扫描 Single Point：单点频率扫描 Log：对频率进行对数扫描
Start/Stop	Start	频率扫描的起始值	频率扫描范围为 Start/Stop 方式
	Stop	频率扫描的终止值	
Center/Span	Center	频率扫描中心值	频率扫描范围为 Center/Span 方式
	Span	频率扫描的范围	
Step-size		频率扫描间隔	频率扫描类型设定为 Linear 有效
Num. of pts.		频率扫描点数	系统自动生成
Pts./decade		频率每增加 10 倍扫描的点数	频率扫描类型设定为 Log 有效
Use sweep plan		是否使用扫描计划	若使用，则要在原理图中添加“Sweep Plan”控件，并在控件中进行相应设置

【Noise】噪声参数设置可进行噪声分析的相关参数的设置。具体参数设置可以在交流仿真控制器设置窗口中的“Noise”选项卡中设置，如图 5-4 所示。参数描述及说明见表 5-2。

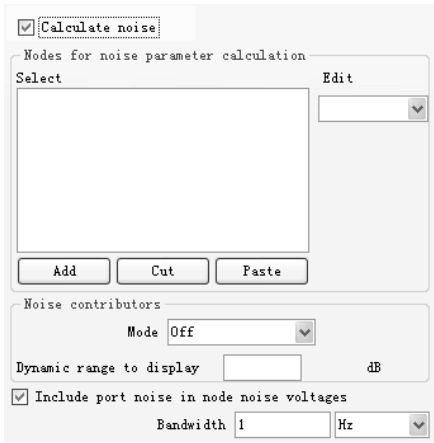


图 5-4　交流仿真的噪声参数设置

表 5-2　交流仿真控制器噪声相关参数设置

参 数 名 称	参 数 描 述	说　明
Calculate noise	是否执行噪声分析	若该选项不选，则其他参数无效
Edit	用于噪声分析的节点名称	节点名称必须在原理图中定义
Noise contributors（Mode）	噪声来源	Off：不选择任何噪声来源 Sort by value：噪声来源按照它们产生噪声的大小排列，低于用户规定的门限值的噪声来源不被列出。非线性器件的各种噪声按照它们的类别分别列出 Sort by name：噪声来源按名称排列 Sort by value with no device details：与 Sort by value 不同的是只列出噪声总和 Sort by name with no device details：噪声来源按名称排列，非线性器件只是列出各类噪声的总和
Dynamic range to display	噪声显示的动态范围	此参数的单位为 dB，表示当噪声源产生的噪声功率小于总噪声减去此参数时，当前噪声来源将不被显示
Bandwidth	噪声分析带宽	默认值 1Hz

【Parameters】仿真参量设置相关参数用来设置交流仿真的频率转换、预算执行、仿真状态信息显示和仿真结果保存等参数。用户可以在交流仿真控制器设置窗口中的“Parameters”选项卡中修改仿真参量设置，如图 5-5 所示。

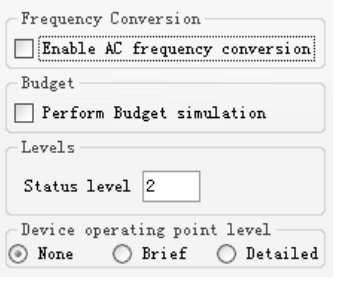


图 5-5　仿真参量设置

交流仿真参量设置与直流仿真参量设置的内容基本相同，因此只介绍直流仿真参量设置中没有的“Enable AC frequency coversion”（允许交流频率变换）项和“Perform Budget simulation”（执行预算仿真）项。

- ☺ 允许交流频率变换（Enable AC frequency coversion）：决定是否允许频率变换，如果选中此项，则可以执行带有频率变换的交流仿真。
- ☺ 执行预算仿真（Perform Budget simulation）：决定是否执行预算仿真，如果选中此项，将在交流仿真的过程中执行预算分析。

2．交流仿真设置控制器

交流仿真设置控制器（Options）如图 5-6 所示，用其设置交流仿真的相关参数，例如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件特性等相关内容。

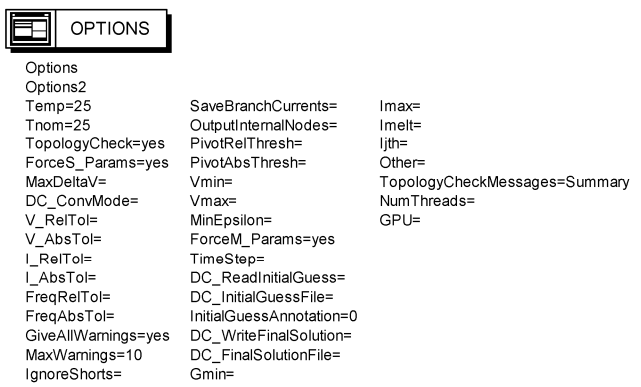


图 5-6　交流仿真设置控制器

3．参数扫描计划控制器

参数扫描计划控制器（Sweep Plan）如图 5-7 所示，主要用来设置仿真中的参数扫描计划。用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量，并制订相应的扫描计划。

4．参数扫描控制器

参数扫描控制器（Prm Swp）如图 5-8 所示，可用其控制仿真中的扫描参数，这些扫描参数可以在多个仿真实例中执行。

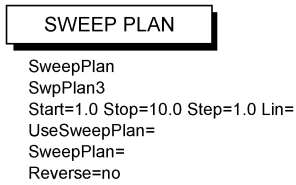


图 5-7　参数扫描计划控制器

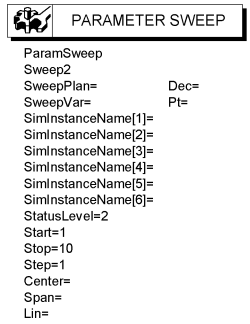


图 5-8　参数扫描控制器

5．节点设置控件与节点名控件

交流仿真面板中的节点设置控件（NdSet）和节点名控件（NdSet Name）如图 5-9 所示，它们与直流仿真中的两个控件完全相同，用来设置交流仿真的相关节点及节点名称。

6．显示模板控件和仿真测量等式控件

显示模板控件（Disp Temp）和仿真测量等式控件（Meas Eqn）如图 5-10 所示，它们与直流仿真中的这两个控件功能相同。

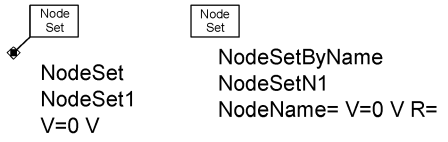


图 5-9　节点设置和节点名控件

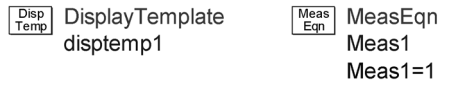


图 5-10　显示模板控件和仿真测量等式控件

7．预算控件

预算控件必须在仿真控制器中“Perform Budget simulation”选项被选中时才起作用，预算控件本质上都是测量方程。预算控件包括：频率预算控件、反射系数预算控件、增益预算控件、噪声系数预算控件、噪声功率预算控件、噪声系数相位预算控件、等效输出噪声温度控件、入射功率预算控件、反射功率预算控件、信噪比预算控件和驻波比运算控件。

【频率预算控件（Bdfreq）】频率预算控件如图 5-11 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_freq(freqIn, pinNumber, "simName")

HB 分析：y = bud_freq(planNumber, pinNumber)

具体参数的含义见表 5-3。

表 5-3　频率预算控件相关参数含义

名　称	描　述	范　围	类　型	是否必须包含该参数
freqIn	输入源频率	(0, ∞)	实数	否
planNumber	选择频率扫描计划，在 HB 分析中使用	[1, ∞)	整数	是
pinNumber	网络引脚标号	[1, ∞)	整数	否
simName	仿真例化名，如“AC1”或“HB1”，在执行多参数仿真时该数据有效		字符串	否

【增益预算控件（BuGain）】增益预算控件如图 5-12 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_gain(vIn, iIn, Zs, Plan, pinNumber, "simName")

　　或 y = bud_gain("SourceName", SrcIndx, Zs, Plan, budgetPath)

具体参数的含义见表 5-4。

表 5-4　增益预算控件相关参数含义

名　称	描　述	范　围	类　型	是否必须包含该参数
vIn	电压输入	(−∞, ∞)	复数	是
iIn	电流输入	(−∞, ∞)	复数	是
SourceName	输入端的器件名称		字符串	是
SrcIndx	频率指示，从参考信号的多频源选择一个频率作为源频率	[1, ∞)	整数	否
Zs	输入阻抗	[0, ∞)	实数	否
Plan	频率扫描计划数目（仅仅在 HB 仿真需要）		字符串	否
pinNumber	网络引脚标号	[1, ∞)	整数	否
budgetPath	选择预算途径		字符串阵列	否
SimName	仿真例化名		字符串	否

例如：

```
x = bud_gain(PORT1.t1.v, PORT1.t1.i)
x = bud_gain("PORT1")
y= bud_gain(PORT1.t1.v, PORT1.t1.i, 75)
y= bud_gain("PORT1", , 75., 1)
z = bud_gain(PORT1.t1.v[3], PORT1.t1.i[3], , 1)
z= bud_gain("PORT1", 3, , 1)
```



BudFreq
BudFreq2
BudFreq2=bud_freq(,1)

图 5-11　频率预算控件



BudGain
BudGain1
BudGain1=bud_gain("PORT1",,50.0,,1)

图 5-12　增益预算控件

【反射系数预算控件（BuGmma）】反射系数预算控件如图 5-13 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_gamma(Zref, Plan, pinNumber, "simName")

具体参数的含义见表 5-5。

表 5-5　反射系数预算控件相关参数含义

名　称	描　述	范　围	类　型	是否必须包含该参数
Zref	输入源阻抗	[0, ∞)	实数	否
plan	频率扫描计划数目（仅 HB 仿真需要）		字符串	否
pinNumber	参考引脚标号	[1, ∞)	整数	否
simName	仿真例化名		字符串	否

例如：

x = bud_gamma() 对于所有的频率返回相应反射系数

y = bud_gamma(75, 1) 在规划参考频率 1 上返回反射系数

【噪声系数预算控件（BudNF）】噪声系数预算控件如图 5-14 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_nf(vIn, iIn, noisevIn)

　　或 y=bud_nf("SourceName",Zs,BW,pinNumber,"simName")

表 5-6 列出其不同于其他控件参数的含义。

表 5-6　噪声系数预算控件相关参数含义

名　称	描　述	范　围	类　型	是否必须包含该参数
noisevIn	噪声输入	(−∞, ∞)	复数	是
BW	带宽	[1, ∞)	实数	否

例如：

```
BudNF1 = bud_nf("PORT1")
BudNF2 = bud_nf("PORT1",50.0,1 Hz,2,"AC1")
BudNF3 = bud_nf("PORT1",budget_path)
BudNF4 = bud_nf(budget_path)
```

其中 budget_path 定义为：

```
budget_path=["PORT1.t1","b2_AMP1.t2","b3_MIX1.t2","b4_AMP2.t2","b5_BPF2.t2","b6.t1"]
```



BudGamma
BudGamma1
BudGamma1=bud_gamma(50.0,,1)

图 5-13　反射系数预算控件



BudNF
BudNF1
BudNF1=bud_nf("PORT1",50.0,1 Hz,1)

图 5-14　噪声系数预算控件

【噪声系数相位预算控件（BudNFd）】噪声系数相位预算控件如图 5-15 所示，其语法为：

AC 分析：　y = bud_nf_deg(vIn, iIn, vOut, iOut, vOut.NC.vnc, vOut.NC.name, Zs, BW)

例如：

```
x=bud_nf_deg(PORT1.t1.v, PORT1.t1.i, Term1.t1.v, Term1.t1.i, vOut.NC.vnc, vOut.NC.name)
x = bud_nf_deg("PORT1", "Term1", "vOut")
```

【噪声功率预算控件（BdNPwr）】噪声功率预算控件如图 5-16 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_noise_pwr(Zref, Plan, pinNumber, "simName")

例如：

```
x = bud_noise_pwr()  对于所有的频率返回噪声功率
y = bud_noise_pwr(75, 1)  在规划参考频率 1 上返回噪声功率
```



BudNFdeg
BudNFdeg1
BudNFdeg1=bud_nf_deg("PORT1","Term2","vout",50.0,1 Hz)

图 5-15　噪声系数相位预算控件



BudNoisePwr
BudNoisePwr1
BudNoisePwr1=bud_noise_pwr(50.0,,1)

图 5-16　噪声功率预算控件

【等效输出噪声温度控件（Bud TN）】等效输出噪声温度控件如图 5-17 所示，其语法为：

AC 分析：y= bud_tn(vIn, iIn, noisevIn, Zs, BW, pinNumber, "simName")

y = bud_tn("SourceName")

例如：

```
x = bud_tn(PORT1.t1.v, PORT1.t1.i, PORT1.t1.v.noise)
x = bud_tn("PORT1")
```

【入射功率预算控件（BudPwrl）】入射功率预算控件如图 5-18 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_pwr_inc(Zref, Plan, pinNumber, "simName")

例如：

```
x = bud_pwr_inc()；对于所有的频率返回入射功率
y = bud_pwr_inc(75, 1)；在规划参考频率 1 上返回入射功率
```



BudTN
BudTN1
BudTN1=bud_tn("PORT1",50.0,1 Hz,1)

图 5-17　等效输出噪声温度控件



BudPwrInc
BudPwrInc1
BudPwrInc1=bud_pwr_inc(50.0,,1)

图 5-18　入射功率预算控件

【反射功率预算控件（BdPwrR）】反射功率预算控件如图 5-19 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_pwr_refl(Zref, Plan, pinNumber, "simName")

【信噪比预算控件（BudSNR）】信噪比预算控件如图 5-20 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_snr(Plan, pinNumber, "simName")

【驻波比运算控件（BdVSWR）】驻波比预算控件如图 5-21 所示，其语法为：

AC 分析：y = bud_vswr(Zref, Plan, pinNumber, "simName")

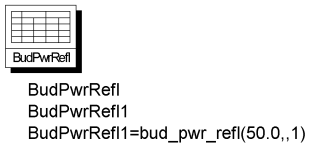


图 5-19 反射功率预算控件

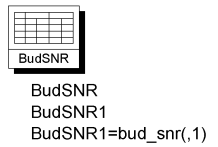


图 5-20 信噪比预算控件



图 5-21 驻波比运算控件

5.3 交流仿真的一般步骤

（1）选择器件模型，并建立电路原理图。

（2）在“Simulation-AC”元件面板列表中选择直流仿真控制器 AC，并放置在原电路图设计窗口中。

（3）双击 AC 参数仿真控制器，在“Frequency”选项卡中对交流仿真中频率扫描类型和扫描范围等进行设置。

（4）如果扫描变量较多，则需要在“Simulation-AC”元件面板中选择“Prm Swp”控件，在其中设置多个扫描变量以及每个扫描变量的扫描类型和扫描参数范围等。

（5）如果需要对电路进行线性噪声分析，则需要在 AC 仿真控制器参数设置窗口的“Noise”选项卡中选中“Calculate noise”项，添加相应信息。

（6）设置完成后，执行仿真。

（7）在数据显示窗口中查看仿真结果。

5.4 ADS 中交流仿真案例

ADS2012 中自带交流仿真案例，通过这个案例可以使读者了解功率放大器的设计及仿真过程，提高利用交流仿真分析线性噪声的能力。

5.4.1 功率放大器交流仿真

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，打开“Tutorial/SimModels_wrk.7zads”工程。

（3）在工程“Folder View”选项卡目录中选择设计 AC1，单击该文件夹，打开 schematic，如图 5-22 所示。

（4）执行菜单栏【Simulate】→【simulate】命令或单击仿真按钮，得到如图 5-23 所示的仿真结果。

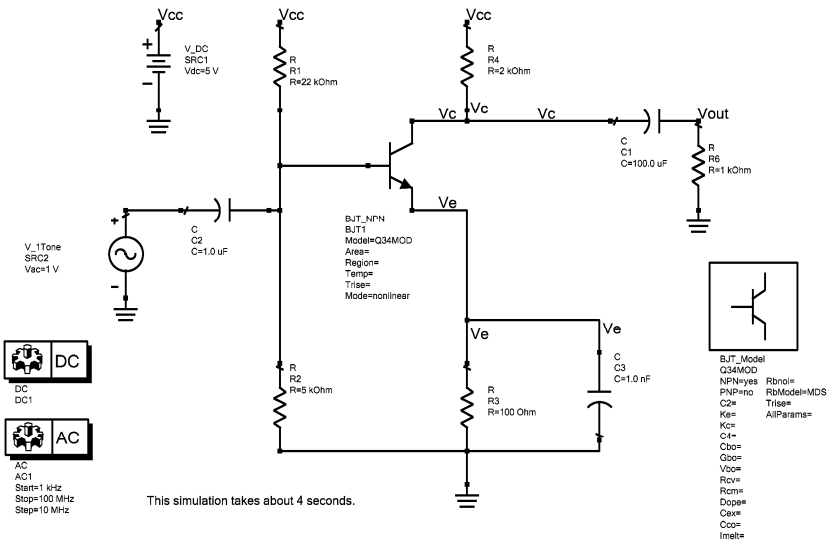


图 5-22　AC1 原理图

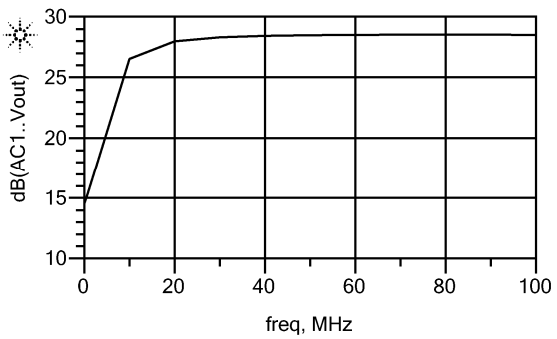


图 5-23　AC1 仿真结果

5.4.2　功率放大器噪声分析

可以通过设置 AC 仿真控件中的“Noise”选项卡，进行功率放大器线性噪声的分析。执行线性噪声分析的步骤如下。

（1）对应电路如图 5-22 所示，首先要注意仿真噪声节点的标识（如 Vout、Ve）。

（2）编辑交流仿真控制器，选择“Noise”选项卡，把“Calculate noise”选中。

（3）在“Edit”窗口，选择需要显示的噪声节点名，如 Vout。

（4）通过“Mode”选项得到噪声源分类方式，可以是 Sort by name（value），如果仅仅是为了获得总的输出噪声，则模式选择 off。

（5）设置“Dynamic range to display”为 40dB，也可以通过设置“Bandwidth”选择合适的带宽，设置后如图 5-24 所示，单击 OK 按钮保存对话框。

（6）运行仿真，单击仿真按钮。

（7）以列表的形式显示数据，这里主要对放大器的噪声进行分析，分析各个噪声源的噪声贡献和在不同频率时总的噪声分布情况。

（8）在数据显示窗口，单击按钮，弹出对话框，选择“name”和“vnc”，如图 5-25 所示，单击 OK 按钮保存对话框。

（9）同步骤（8），添加参数“Vout.noise”，单击 OK 按钮保存对话框。

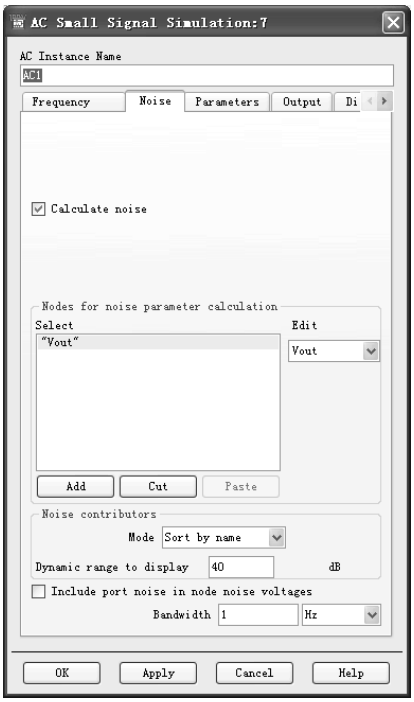


图 5-24 “Noise”选项卡设置

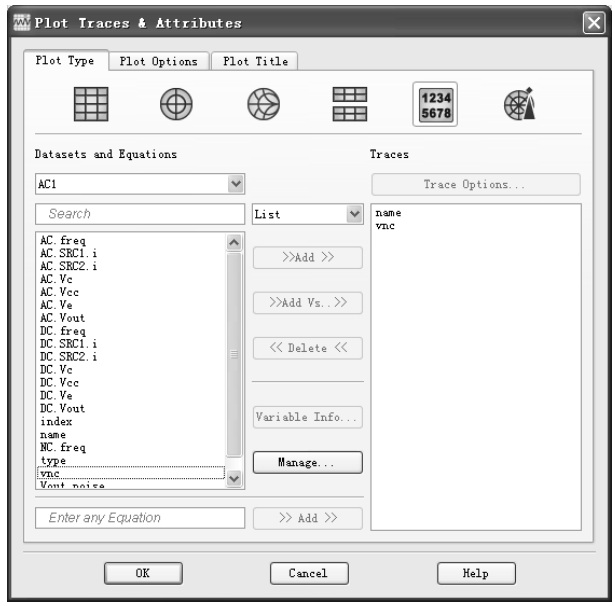


图 5-25 添加列表数据

（10）得到噪声分析的数据，如图 5-26 所示。

index	vnc	name
freq=1.000 kHz		
0	9.975 nV	_total
1	6.807 nV	R3
2	6.281 nV	BJT1
3	5.265 nV	BJT1.Rb
4	2.522 nV	BJT1.ice
5	2.230 nV	BJT1.ibe
6	621.3 pV	BJT1.Re
7	2.690 nV	R6
8	1.902 nV	R4
9	1.529 nV	R2
10	729.1 pV	R1
freq=10.00 MHz		
0	24.08 nV	_total
1	23.47 nV	BJT1
2	21.06 nV	BJT1.Rb
3	9.752 nV	BJT1.ice
4	2.519 nV	BJT1.ibe
5	2.485 nV	BJT1.Re
6	4.278 nV	R3
7	2.656 nV	R6
8	1.878 nV	R4
freq=20.00 MHz		
0	28.00 nV	_total
1	27.69 nV	BJT1
2	24.86 nV	BJT1.Rb
3	11.51 nV	BJT1.ice
4	2.933 nV	BJT1.Re

（a）各个噪声来源的噪声贡献

freq	Vout.noise
1.000 kHz	9.975 nV
10.00 MHz	24.08 nV
20.00 MHz	28.00 nV
30.00 MHz	29.01 nV
40.00 MHz	29.38 nV
50.00 MHz	29.55 nV
60.00 MHz	29.63 nV
70.00 MHz	29.66 nV
80.00 MHz	29.67 nV
90.00 MHz	29.66 nV
100.0 MHz	29.64 nV

（b）总的噪声

图 5-26 噪声分析的数据

5.5　交流仿真实例

本节在一般交流仿真的基础上，对交流小信号特性进行分析，进一步细化 ADS 交流仿真的步骤以及相关数据基本操作。

☺ 交流小信号仿真和噪声分析;

☺ 变量扫描、参数调谐和写方程;

☺ 控制图标、曲线、数据组和交流源。

5.5.1　交流小信号分析

1．创建新设计

（1）启动 ADS2012 软件，新建项目空间，命名为 chapter5_wrk。

（2）按 4.5.1 节中的方法新建一个三极管模型。

> 可以直接在第 4 章仿真文件上修改操作，本书为了文件管理方便，把 chapter4_wrk 项目空间重新命名为 chapter5_wrk，也便于读者使用，后续章节还会用到这个三极管。

（3）在 bias_netcomputer 文件夹上单击鼠标右键，选择 rename，将该文件夹重新命名为 ac_sim，修改原理图。

☺ 在“Lumped-Components”元件面板中选择电容（理想通交隔直电容），选择电阻，阻值改为 50Ω负载。

☺ 在“Sources-Freq Domain”元件面板中选择源。

（4）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来。

（5）单击工具栏图标，添加节点名称 Vcc、Vin、Vout，连接好的电路如图 5-27 所示。

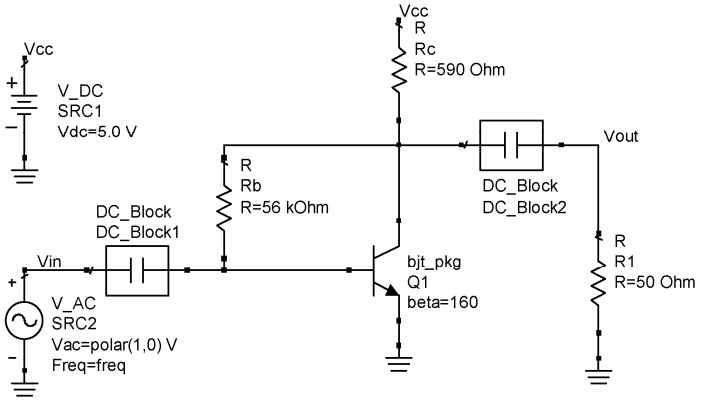


图 5-27　交流仿真原理图

2．建立 AC 仿真

（1）在“Simulation-AC”元件面板中选择控件，放到原理图适当位置。

（2）双击交流仿真控制器，设置 Start、Stop 和 Step-size 参数属性。

☺ Start=100MHz;

☺ Stop=4GHz;

☺ Step-size=100MHz。

（3）鼠标左键双击 AC 控件，单击“Noise”选项卡，选中“Calculate noise”选项，在“Edit”对话框，添加噪声分析节点为“Vout”，单击 Add 按钮。噪声电压的排列方式选择“Sort by name”，单击 OK 按钮，完成设置，如图 5-28 所示。

（4）单击“Display”选项卡，将“Calc Noise”（计算噪声）和“NoiseNode”（噪声节点）两个参数显示出来，完整参数设置 AC 控件如图 5-29 所示。

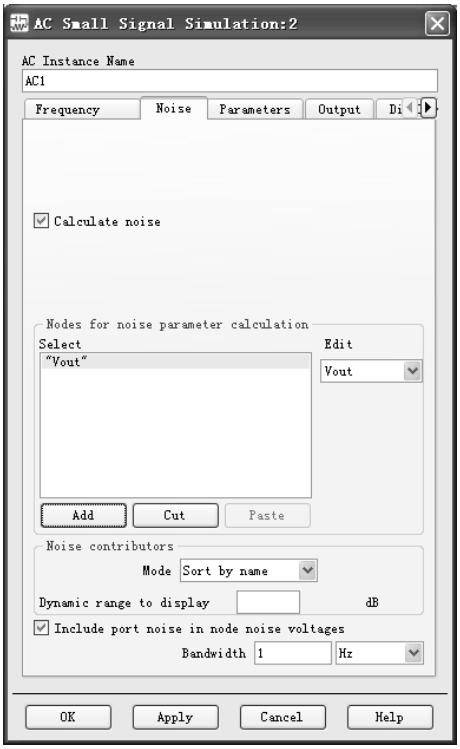


图 5-28　完成设置

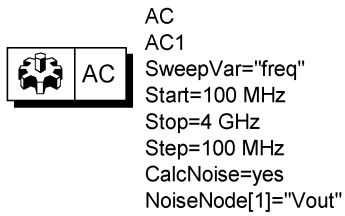


图 5-29　交流仿真控制器设置

（5）单击仿真按钮，进行仿真。查看仿真结果。

3．显示噪声数据

（1）打开数据显示窗口。

（2）单击图标，以 list 方式显示数据，选择噪声电压名称 name（默认）、vnc（voltage noise contributors），单击 OK 按钮，得到噪声电压仿真结果，如图 5-30 所示。图中显示了 100～300MHz 的数据，把显示数据选中，单击工具条上的按钮，可以查看其他组数据。

index	name	vnc
freq=100.0 MHz		
0	_total	1.708 nV
1	Q1.BJT1	1.469 nV
2	Q1.BJT1.ibe	26.00 pV
3	Q1.BJT1.ice	1.469 nV
4	Q1.L1	73.43 pV
5	R1	833.5 pV
6	Rb	24.91 pV
7	Rc	242.7 pV
freq=200.0 MHz		
0	_total	1.687 nV
1	Q1.BJT1	1.448 nV
2	Q1.BJT1.ibe	51.34 pV
3	Q1.BJT1.ice	1.447 nV
4	Q1.L1	72.51 pV
5	R1	827.1 pV
6	Rb	24.71 pV
7	Rc	240.8 pV
freq=300.0 MHz		
0	_total	1.652 nV
1	Q1.BJT1	1.414 nV
2	Q1.BJT1.ibe	75.45 pV
3	Q1.BJT1.ice	1.412 nV
4	Q1.L1	71.05 pV
5	R1	817.0 pV
6	Rb	24.41 pV
7	Rc	237.8 pV

图 5-30　噪声电压仿真结果

从图 5-30 中可以看出，在各个频点的噪声贡献，如频率为 200MHz 时总的噪声电压为 1.687nV，晶体管 Q1.BJT1 的噪声电压大小为 1.448nV，晶体管的电压噪声由两部分组成：Q1.BJT1.ibe 和 Q1.BJT1.ice。这就说明晶体管的噪声来源于基极-射极电流（i_{be}）和集电极-射极电流（i_{ce}），但是它们是非相关噪声电压，总的噪声功率（noise powers）为 $V_{total}^2=V_{i_{be}}^2+V_{i_{ce}}^2$，当然也可以插入一个单独的 Vout.noise 来验证这个公式。

（3）单击图标，保存显示数据。

上面的仿真结果默认的仿真温度是室温（25℃），这个温度不是 IEEE 标准的噪声温度（290K），用户可以通过“Options”选项卡设置环境温度，如把温度设置为 16.85，如图 5-31 所示，重新仿真，查看结果如何变化。

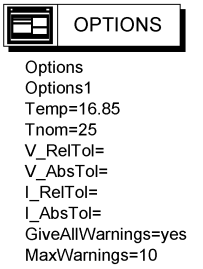


图 5-31　交流仿真 Options 温度设置

4．计算并显示电路增益

（1）在“Simulation-AC”元件面板中，在原理图中插入控件图标定义方程。

（2）需要计算电路电压的增益，双击编辑 Eqn 控制器，进入属性编辑对话框，输入方程 Gain_dB=20*log(mag(Vout)/mag(Vin))，如图 5-32 所示。

（3）返回原里图界面，关闭噪声仿真，如图 5-33 所示。

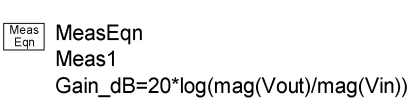


图 5-32　等式控制器设置

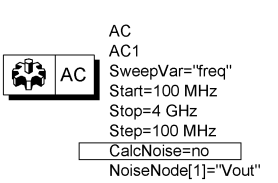


图 5-33　AC 控制器设置

（4）单击仿真按钮，以列表的方式显示数据，如图 5-34 所示。

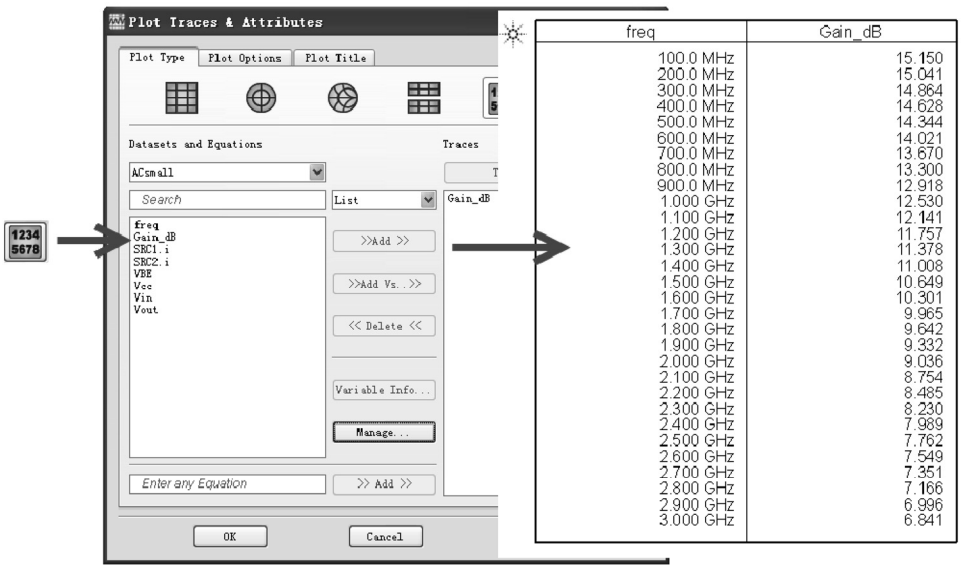


图 5-34　增益显示结果

（5）在数据显示窗口插入方程，如图 5-35 所示，增益的结果可以同时用，以分贝和一般的输出、输入比两种方式显示，更便于观察，如图 5-36 所示。

Eqn Gain=mag(Vout)/mag(Vin)

图 5-35　数据显示窗口插入方程

（6）单击按钮，电路增益曲线如图 5-37 所示。

freq	Gain_dB	Gain
100.0 MHz	15.419	5.901
200.0 MHz	15.409	5.895
300.0 MHz	15.393	5.883
400.0 MHz	15.370	5.868
500.0 MHz	15.340	5.848
600.0 MHz	15.305	5.824
700.0 MHz	15.263	5.796
800.0 MHz	15.215	5.765
900.0 MHz	15.162	5.729
1.000 GHz	15.103	5.691
1.100 GHz	15.039	5.649
1.200 GHz	14.970	5.604
1.300 GHz	14.896	5.557
1.400 GHz	14.818	5.507
1.500 GHz	14.735	5.455
1.600 GHz	14.649	5.401
1.700 GHz	14.558	5.345
1.800 GHz	14.465	5.287
1.900 GHz	14.368	5.229
2.000 GHz	14.268	5.169
2.100 GHz	14.165	5.108
2.200 GHz	14.060	5.047
2.300 GHz	13.953	4.985
2.400 GHz	13.844	4.923
2.500 GHz	13.733	4.860
2.600 GHz	13.621	4.798
2.700 GHz	13.507	4.735
2.800 GHz	13.392	4.673
2.900 GHz	13.275	4.611
3.000 GHz	13.159	4.549

图 5-36　电路增益数据

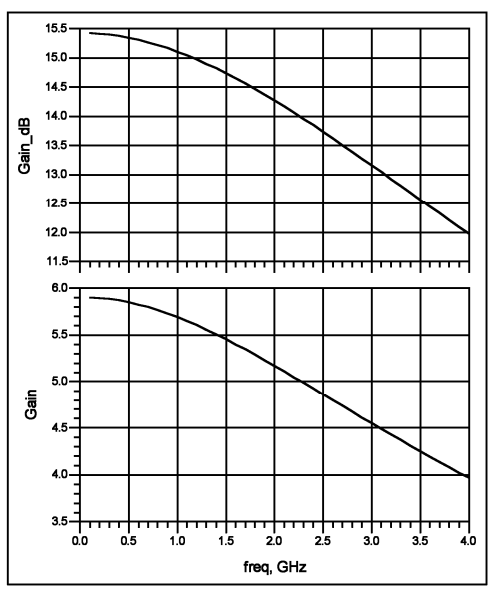


图 5-37　电路增益曲线

5．调整 beta 参数

（1）单击原理图窗口工具栏图标，原理图窗口会自动调整原理图的显示使其与当前窗口的大小相适应。

（2）在该原理图窗口单击工具栏图标，出现调谐控制对话框，如图 5-38 所示。

（3）返回原理图窗口，用光标选择晶体管 Q1，如图 5-39 所示。

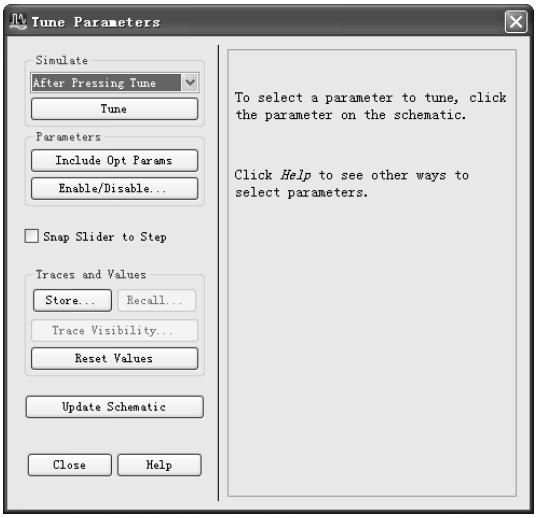


图 5-38　调谐控制对话框

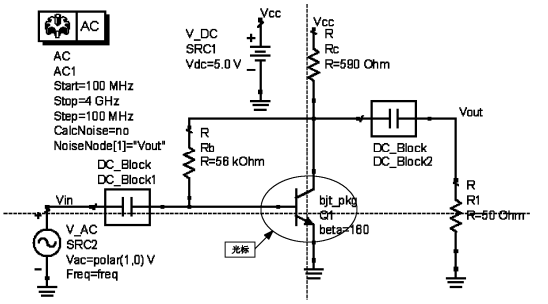


图 5-39　在原理图窗口选中晶体管 Q1

（4）弹出对话框，选中 beta，如图 5-40 所示，调谐参数窗口变为如图 5-41 所示。

（5）在控制对话框中调节 Q1 的 beta 值，仿真结果曲线会实时显示在数据显示窗口中。

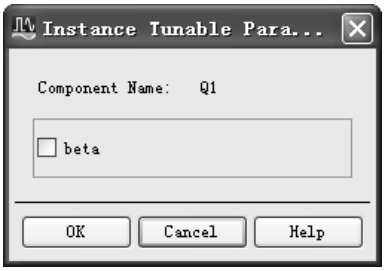


图 5-40　调谐器件选中后调谐参数选择

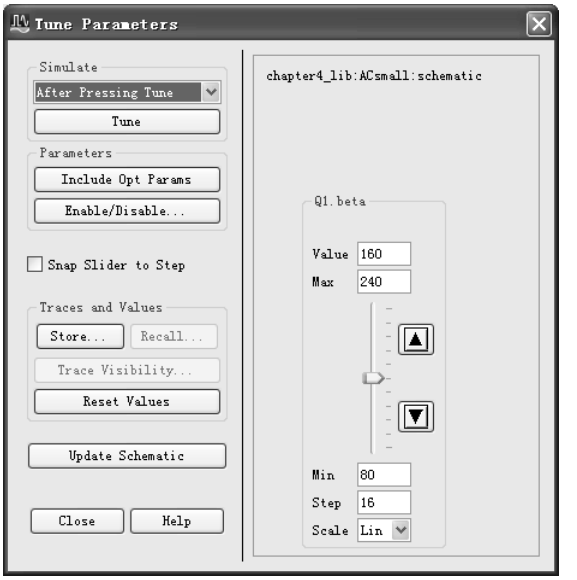


图 5-41　新的调谐控制对话框

在调节控制对话框中，可以直接修改最大、最小、调节步长和变化范围等参数。

（6）调节过程中，单击 Update Schematic 按钮，可以更新原理图中相应元件的参数值。

（7）调整使 Gain 达到指标后，单击 Close 按钮。此时，出现对话框询问是否更新相应元件的参数值。单击 Yes 按钮，保存该结果。

5.5.2 多参数扫描

1．Vcc 扫描

本步将对 Vcc 范围设置为 2～5V，步长 0.5V 进行参数扫描。

（1）在原理图中，插入 VAR（变量方程）控件，单击该图标，把变量设置为 Vbias，初值设置为 5V，如图 5-42 所示。

（2）重新定义源，使 Vdc=Vbias，如图 5-43 所示。

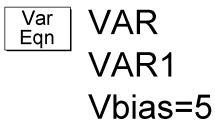


图 5-42　修改后变量方程控件图标

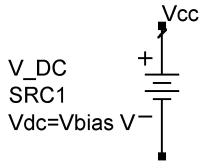
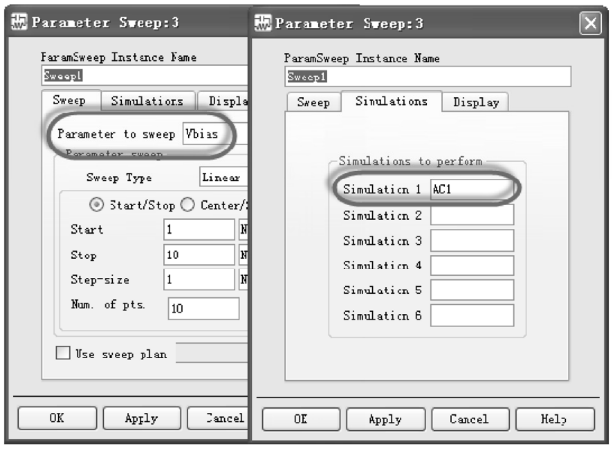


图 5-43　重新定义源

（3）从 AC 仿真面板中选择插入 Parameter Sweep（参数扫描）控件到原理图中，双击该控件，设置其属性，在“Sweep”选项卡的“Parameter to sweep”栏，设为 Vbias 变量，在“Simulations”选项卡，在“Simulation 1”栏设置为 AC1，其他默认，单击 OK 按钮，如图 5-44 所示。



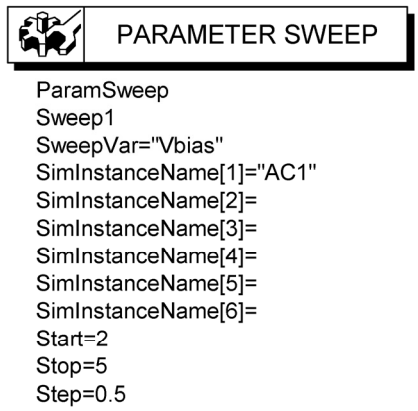


图 5-44　参数扫描设置

（4）在原理图中，单击工具栏【Simulate】→【Simulation Setting…】项，弹出仿真设置对话框，改变数据组名“Data Display”下的对话框，填写为 ac_bat_swp，单击 Simulate 按钮进行仿真，如图 5-45 所示。

（5）在数据显示窗口插入矩形图，对 Vout 的幅度（magnitude）进行绘图。仿真结果如图 5-46 所示。

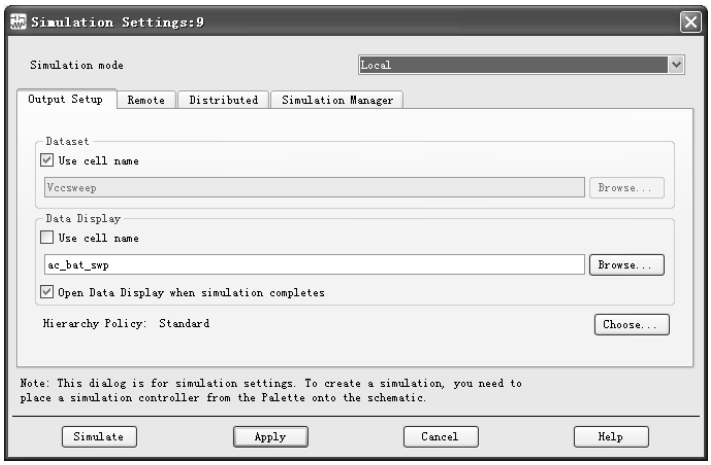


图 5-45　仿真设置对话框

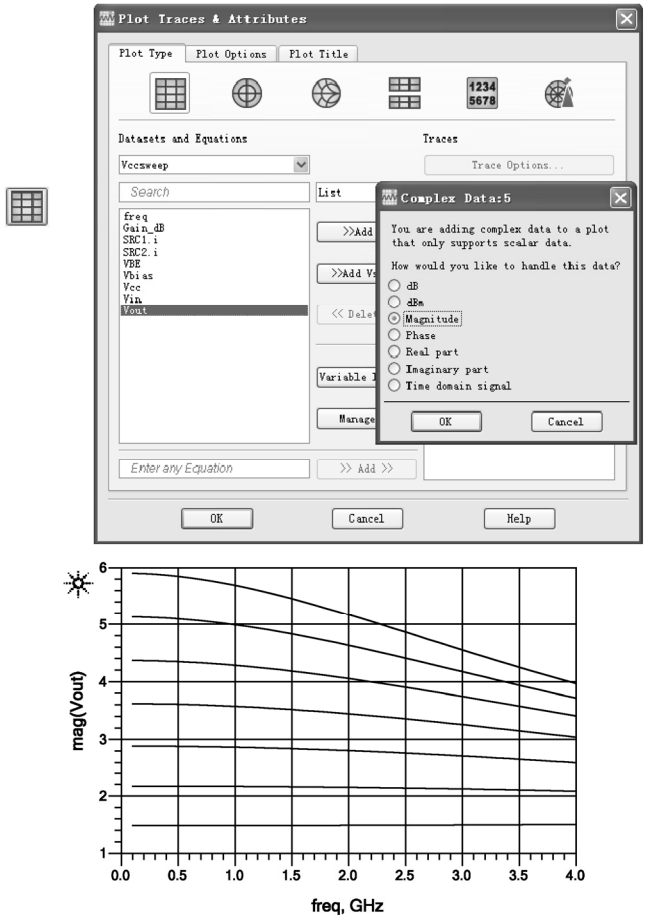


图 5-46　仿真结果

（6）双击图 5-46 中的曲线，弹出“Trace Options”窗口，如图 5-47 所示。在“Trace Options”选项卡中对曲线与轨迹进行编辑，将“Display Label”选项选中，可以在仿真曲线上显示 Vbias 标签，如图 5-48 所示。

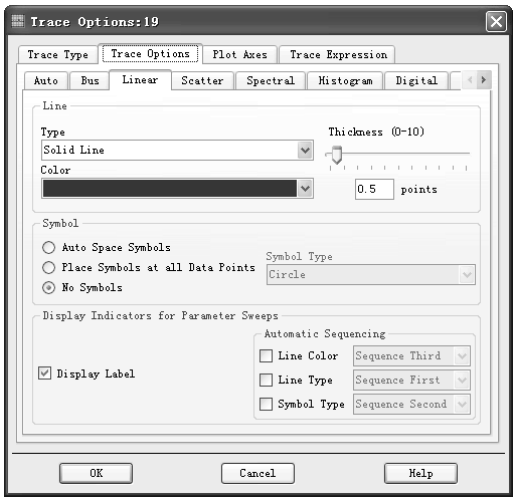


图 5-47　Trace Options 设置

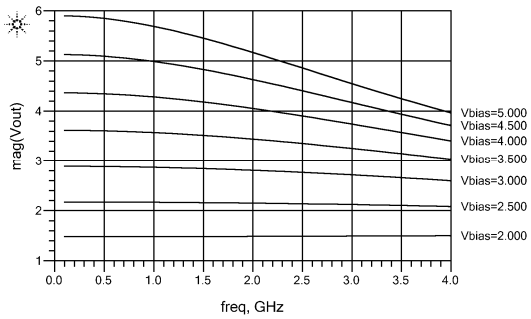


图 5-48　修改后的仿真结果

（7）为了观察某些特殊的点，可以根据需要插入标记，单击按钮，保存所有的操作。

除了增益外，放大器电路的相位延时也是电路的重要指标，它们主要描述了系统的相移特性。相位延时是系统给定角频率的简谐信号所产生的延迟，相位延时出现在载波因子中，它表示的是单一频率的载波延迟。而群延时定义为相移特性的微分，它表示一个载频信号的包络延迟，包络是包含着一定的带宽的，所以群延时表示了一定带宽的一组频率成分的延迟。在没有产生相位失真的条件下，系统的群延时为常数。在交流仿真中，主要分析电路的输入信号和输出信号的相位关系，相位延时和群延时特性将在 S 参数仿真中分析。

2．相位特性分析

（1）在数据显示窗口单击图标，弹出对话框，插入 Vin 和 Vout 数据，如图 5-49 所示，单击 OK 按钮，则 Vin 和 Vout 曲线如图 5-50 所示。

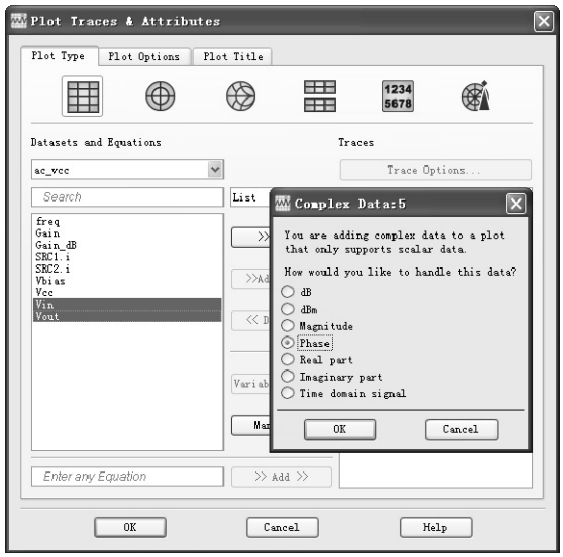


图 5-49　相位特性仿真设置

（2）插入新的方程计算群时延，如图 5-51 所示。diff 函数用于计算在下降曲线上不同点之间的斜率差别。其中的负号表明结果为下降值。在曲线上放置标记 m1（diff 函数在 1 900MHz（+/−50MHz）两边都会有标记）。

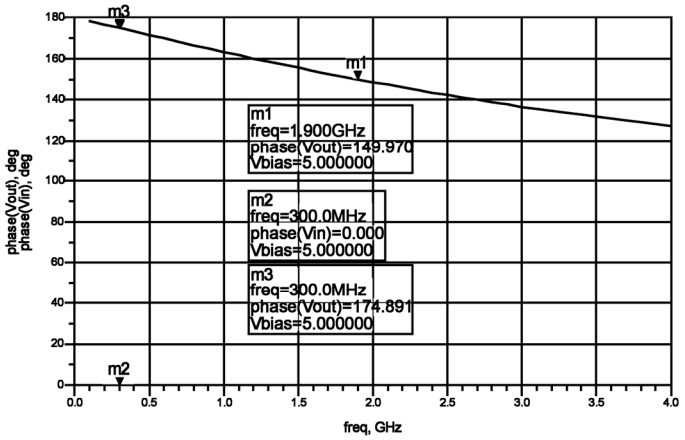


图 5-50　输入、输出的相频特性

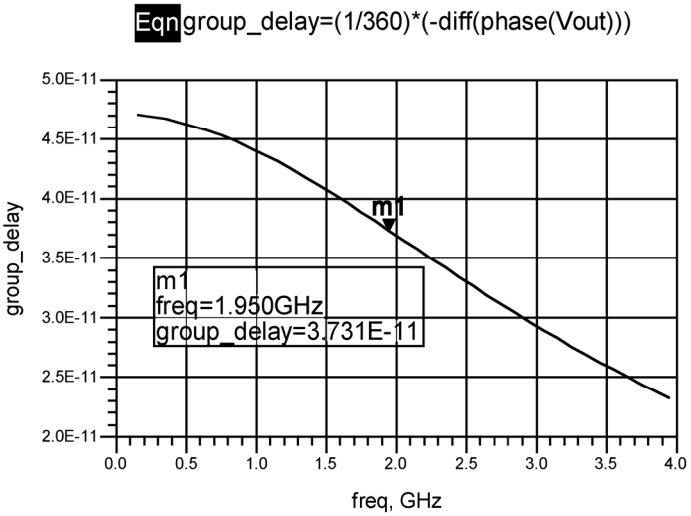


图 5-51　群延时结果

📖 相频特性的矩形图在 1 900MHz 处标记，发现反相不是 180°，这是由于 bjt_pkg 的参数造成的。增加其他标记就会发现相位在更低频率点处更接近 180°。

5.6　思考题

（1）在新的设计中，进行带端口噪声和端口的仿真。修改图 5-27，以 P_1Tone 源为端口 1（Num=2），并在输出端放置一个终端负载作为端口 2（Num=1），这两个端口如图 5-52 所示，重新仿真查看数据有哪些变化。

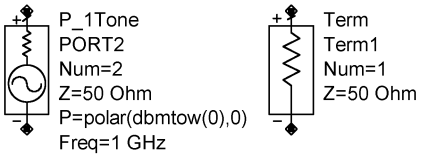


图 5-52　端口

（2）在新的设计中，修改图 5-27，插入一个恒定电流源并仿真，这里需要给电流源并联一个大电阻，因为仿真器要检验到它的直流通路，而电流源本身是开路的，重新仿真查看数据有哪些变化。

第 6 章　S 参数仿真

在进行射频/微波电路设计时，节点电路理论已不再适用，需要采用分布参数电路的分析方法。这时可以采用复杂的场分析法，但更多的时候是采用微波网络法来分析电路。对于微波网络而言，最重要的参数就是 S 参数。在个人计算机平台迈入 GHz 阶段之后，从计算机的中央处理器、显示界面、存储器总线到 I/O 接口，全部走入高频传送的阶段，所以现在不但进行射频微波电路设计时需要了解 S 参数相关知识，进行计算机系统甚至消费电子系统设计时也需要对相关知识有所掌握。本章通过实例介绍 ADS2012 实现 S 参数仿真的原理和方法。



6.1　S 参数仿真基本原理及功能

1．S 参数的概念

在低频电路中，元件的尺寸相对于信号的波长而言可以忽略（通常小于波长的十分之一），这种情况下的电路被称为节点（Lump）电路，这时可以采用常规的电压、电流定律来进行电路计算。

但在高频/微波电路中，由于波长较短，组件的尺寸就无法再视为一个节点，某一瞬间组件上所分布的电压、电流会不一致。因此基本的电路理论不再适用，而必须采用电磁场理论中的反射及传输模式来分析电路。元件内部电磁波的进行波与反射波的干涉使电压和电流失去了一致性，电压电流比为稳定状态的固有特性也不再适用，取而代之的是“分布参数”的特性阻抗观念，此时的电路以电磁波传送与反射为基础要素，即反射系数、衰减系数、传送的延迟时间。

分布参数电路采用场分析法，但场分析法过于复杂，因此需要一种简化的分析方法。微波网络法广泛运用于微波系统的分析，是一种等效电路法，在分析场分布的基础上，用路的方法将微波元件等效为电抗或电阻器件，将实际的导波传输系统等效为传输线，从而将实际的微波系统简化为微波网络，将场的问题转化为路的问题来解决。

一般地，对于一个有 Y、Z 和 S 参数的网络是可以实际测量和分析的，其中 Y 称为导纳参数，Z 称为阻抗参数，S 称为散射参数。Z 和 Y 参数对于集总参数电路分析非常有效，各参数可以很方便地测试。但是在微波系统中，由于确定非 TEM 波电压、电流的困难性，而且在微波频率测量电压和电流也存在实际困难，因此，在处理高频网络时，等效电压和电流以及有关的阻抗和导纳参数变得较抽象。与直接测量入射、反射及传输波概念更加一致的是散射参数，即 S 参数矩阵，它更适合于分布参数电路。

S 参数是建立在入射波、反射波关系基础上的网络参数，适于微波电路分析，以器件端口的反射信号以及从该端口传向另一端口的信号来描述电路网络。同 N 端口网络的阻抗和

导纳参数一样，用散射参数亦能对 N 端口网络进行完善的描述。阻抗和导纳参数反映了端口的总电压和电流的关系，而散射参数则反映端口的入射电压波和反射电压波的关系。散射参数可以直接用网络分析仪测量得到，而且可以用网络分析法来计算。

下面以二端口网络为例说明 S 参数的含义，如图 6-1 所示。

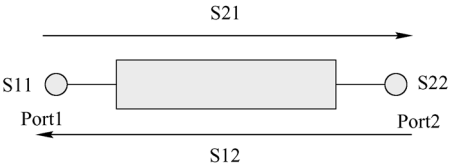


图 6-1　二端口网络模型

二端口网络有四个 S 参数，Sij 表示能量从 j 口注入，在 i 口测得的能量，如 S11 定义为从 Port1 口反射的能量与输入能量比值的平方根，也经常被简化为等效反射电压和等效入射电压的比值，各参数的物理含义和特殊网络的特性如下：

☺ S11：端口 2 匹配时，端口 1 的反射系数；

☺ S22：端口 1 匹配时，端口 2 的反射系数；

☺ S12：端口 1 匹配时，端口 2 到端口 1 的反向传输系数；

☺ S21：端口 2 匹配时，端口 1 到端口 2 的正向传输系数。

对于互易网络，S12＝S21。

对于对称网络，S11＝S22。

对于无耗网络，$(S11)^2+(S22)^2=1$。

通常可以将单根传输线或一个过孔等效成一个二端口网络。一端 Port1 接输入信号，另一端 Port2 接输出信号，那么 S11 表示回波损耗，即有多少能量被反射回源端（Port1），该值越小越好，一般建议 S11<0.1，即-20dB；S21 表示插入损耗，即有多少能量被传输到目的端（Port2），该值越大表示传输的效率越高，理想值是 1，即 0dB。一般建议 S21>0.7，即-3dB。如果网络是无耗的，那么只要 Port1 上的 S11 很小就可以使 S21>0.7 的要求得到满足，但通常传输线是有耗的，尤其在 GHz 以上时，损耗很显著，即使在 Port1 上没有反射，经过长距离的传输线后 S21 的值会变得很小，说明能量在传输过程中受到消耗。

2．S 参数在电路仿真中的应用

S 参数自问世以来已在电路仿真中得到广泛使用。针对射频和微波应用的综合和分析工具几乎都许诺具有用 S 参数进行仿真的能力，这其中包括安捷伦公司的 ADS。

ADS 仿真器中都可以找到 S 参数模块，用户可以对每个 S 参数进行设置完成相应的仿真。同时，用户也可以通过网络分析仪对要生产的 PCB 进行精确的 S 参数测量。用户还可以采用元件厂家提供的 S 参数进行仿真，据安捷伦 EDA 部门的一位应用工程师在文章中介绍：“这些数据通常是在与最终应用环境不同的环境中测得的。这可能在仿真中引入误差。”他举例，当电容器安装在不同类型的印制电路板上时，电容器会因为安装焊盘和电路板材料（如厚度、介电常数等）而存在不同的谐振频率。固态器件也会遇到类似问题（如 LNA 应用中的晶体管）。为避免这些问题，最好在实验室中测量 S 参数。但无论如何，为了进行射频系统仿真，无法回避使用 S 参数模型，而这些数据是来自设计师的亲自测量还是直接从

元件厂家获得，则是由高频电子电路的特性所决定的。

S 参数仿真的主要功能包括以下几个方面。

☺ 获得器件或电路的 S 参数，并可以将该参数转换成 Y 参数或 Z 参数；

☺ 仿真群延时；

☺ 仿真线性噪声；

☺ 分析频率改变对小信号的影响；

☺ 仿真混频器电路的 S 参数。

6.2　S 参数仿真面板与仿真控制器

ADS 中有专门针对 S 参数仿真的元件面板，在“Simulation-S_Param”类元件面板中提供了所有 S 参数仿真需要的控件，如图 6-2 所示。

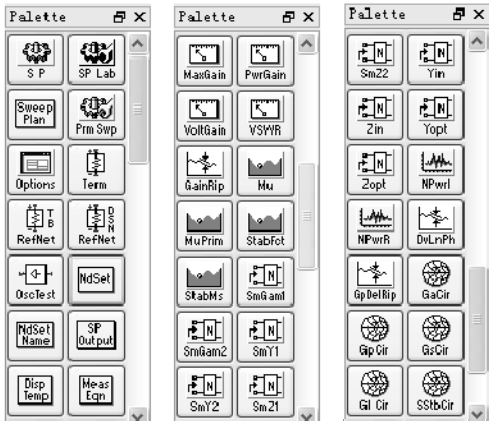


图 6-2　S 参数仿真面板

常用的控件名称如下。

SP：S 参数仿真控制器

Sweep Plan：参数扫描计划控制器

Options：S 参数仿真设置控制器

RefNet：参考网络控件

NdSet：节点设置控件

NdSet Name：节点名控件

SP Output：S 参数输出控件

Disp Temp：显示模板控件

Meas Eqn：仿真测量等式控件

MaxGain：最大增益控件

PwrGain：功率增益控件

VoltGain：电压增益控件

VSWR：电压驻波比控件

GainRip：增益波纹控件

Mu：计算负载稳定系数控件

MuPrim：计算源稳定系数控件

Stabfct：计算 Rollett 稳定因子 K

StabMs：计算电路稳定系数 b

Yin：输入导纳控件

Zin：输入阻抗控件

GaCir ~ NsCir：Smith 圆图控件

SP Lab：S 参数仿真测试平台控件

Prm Swp：参数扫描控制器

Term：终端负载

OscTest：接地振荡器测试

【S 参数仿真控制器】S 参数仿真控制器（SP）在原理图中如图 6-3 所示，它是控制 S 参数仿真最主要的控件，可以设置 S 参数仿真的频率扫描范围、仿真执行参数和噪声分析相关参数等内容。双击 S 参数仿真控制器，弹出参数设置选项卡，可以同构该选项卡随 SP 参数进行设置。



S_Param
SP1

SweepVar="freq"	CalcZ=no	Other=
SweepPlan=	CalcGroupDelay=	UseSavedEquationNestLevel=yes
Start=1.0 GHz	GroupDelayAperture=1e-4	SavedEquationNestLevel=2
Stop=10.0 GHz	FreqConversion=no	SavedEquationName[1]=
Step=1.0 GHz	FreqConversionPort=1	AttachedEquationName[1]=
Center=	UseFiniteDiff=	EnforcePassivity=
Span=	StatusLevel=2	
Lin=	CalcNoise=no	
Dec=	SortNoise=Off	
OutputPlan[1]=	NoiseThresh=	
UseEquationNestLevel=yes	BandwidthForNoise=1.0 Hz	
EquationNestLevel=2	Freq=	
EquationName[1]=	DevOpPtLevel=None	
CalcS=yes	NoiseInputPort=	
CalcY=no	NoiseOutputPort=	

图 6-3　S 参数仿真控制器

☺ Frequency：S 参数仿真要在一定频率范围内执行，因此在 S 参数仿真执行前通过 S 参数仿真控制器设置窗口中的“Frequency”选项卡对频率参数进行设置，如图 6-4 所示。

☺ Parameters：S 参数仿真中的参数计算、频率转换、仿真状态信息显示和仿真结果保存等参数，用户可以通过“Parameters”选项卡进行设置，如图 6-5 所示。

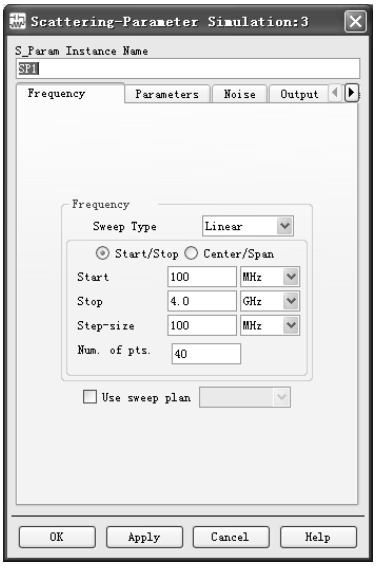


图 6-4 “Frequency”选项卡

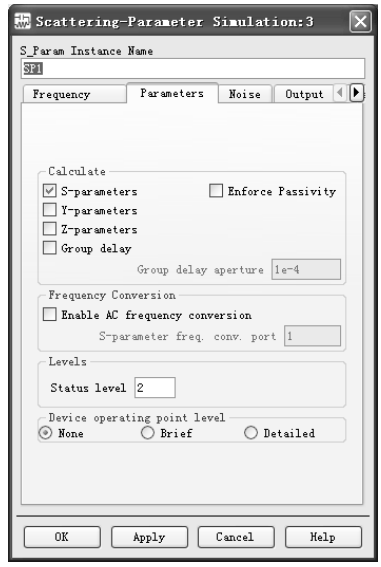


图 6-5 “Parameters”选项卡

▻ 参数计算（Calculate）：设置仿真过程中计算的参数，包括 S 参数（S-parameters）、Y 参数（Y-parameters）、Z 参数（Z-parameters）、群延时参数（Group delay）。用户可以选中需计算的参数，仿真结束后可以在仿真结果中查看这个参数。

- 频率转换（Enable AC frequency conversion）：决定是否允许进行频率转换。如果选中此项，则可以执行带有频率转换的 S 参数仿真。
- 仿真状态显示（Status level）：设置仿真状态窗口中显示信息的多少。其中，0 表示显示很少的仿真信息，1 和 2 表示显示正常的仿真信息，3 和 4 表示显示较多的仿真信息。
- 器件的操作点信息设置（Device operating point level）：设置数据文件是否保存原理图中的有源器件和部分线性器件的操作点。其中，None 表示不保存有源器件和部分线性器件的操作点相关系数，Brief 表示仅保存部分元件的电流、功率和一些线性器件的参数，Detailed 表示保存所有直流仿真的工作点值，例如电流、电压、功率和线性器件参数。

☺ Noise：在 S 参数仿真中同样可以进行噪声分析，噪声分析的相关参数可以通过“Noise”选项卡进行设置，如图 6-6 所示。

- 是否执行噪声分析（Calculate noise）：设定用 S 参数仿真过程中是否执行噪声分析，如果选择不执行噪声分析，则“Noise”选项卡中的其他参数设置无效。
- 噪声输入端口（Noise input port）：设定噪声分析时噪声的输入端口。
- 噪声输出端口（Noise output port）：设定噪声分析时噪声的输出端口。
- 噪声来源分析（Noise contributors）：设定噪声分析时各噪声来源的分类方法。
- 噪声显示的动态范围（Dynamic range to display）：用来设定噪声显示的范围。
- 噪声带宽（Bandwidth）：设定噪声分析带宽。

☺ “Output”、“Display”两个选项卡的参数和功能与前面介绍的一致，不再说明。

【S 参数仿真测试平台控件】S 参数仿真测试平台控件（SP Lab）如图 6-7 所示，它专门用来建立 S 参数仿真的测试平台，其参数与 S 参数仿真控制器的参数相同。

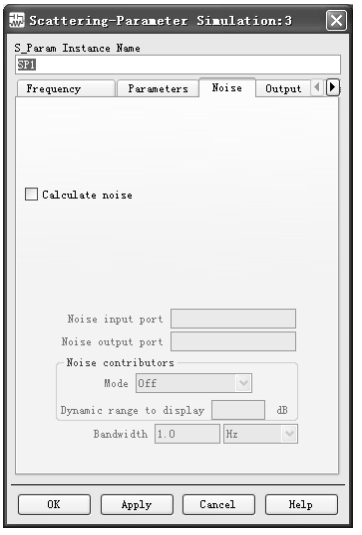


图 6-6　“Noise”选项卡

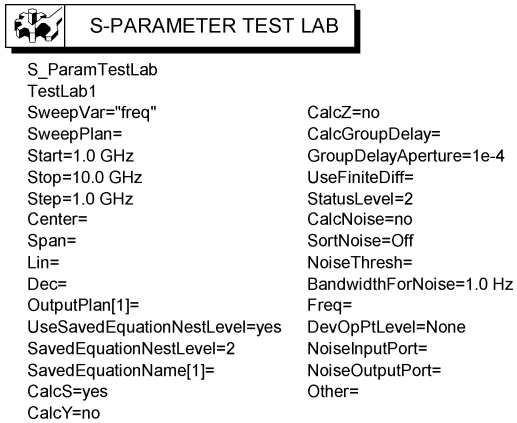


图 6-7　S 参数仿真测试平台控件

【参数扫描计划控制器】参数扫描计划控制器（Sweep Plan）如图 6-8 所示，主要用来设置仿真中的参数扫描计划。用户可以通过该控制器添加一个或多个扫描变量，并制订相应的扫描计划。

【参数扫描控制器】参数扫描控制器（Prm Swp）如图 6-9 所示，用来设定仿真中的扫描参数。该控制器设定的扫描参数可以在多个仿真实例中使用。



图 6-8　参数扫描计划控制器

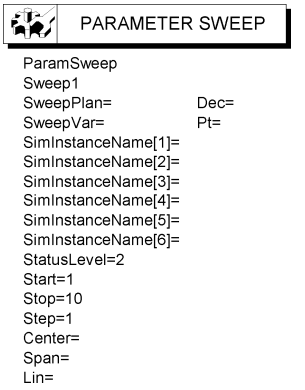


图 6-9　参数扫描控制器

【S 参数仿真设置控制器】S 参数仿真设置控制器（Options）如图 6-10 所示，主要用来进行 S 参数仿真时环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件特性等相关参数的设置。

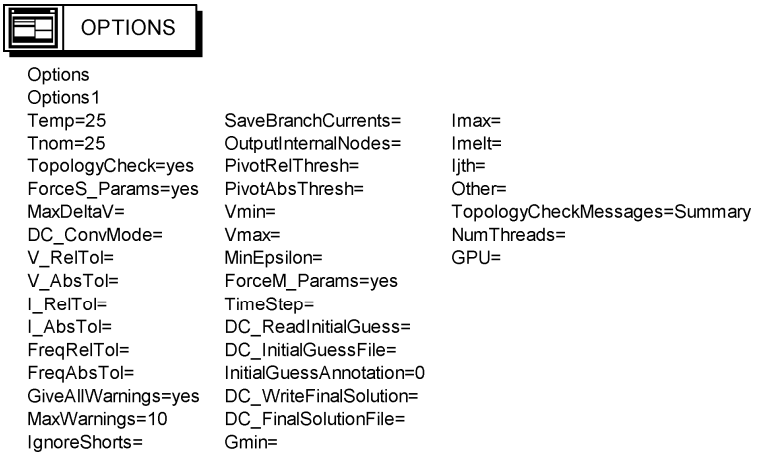


图 6-10　S 参数仿真设置控制器

【终端负载】终端负载（Term）如图 6-11 所示，用来定义端口标号以及设定各端口终端负载阻抗。

【最大增益控件】最大增益控件（MaxGain）如图 6-12 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路的最大增益数据组。

【功率增益控件】功率增益控件（PwrGain）如图 6-13 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路功率增益的数据组。

【电压增益控件】电压增益控件（VoltGain）如图 6-14 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路电压增益的数据组。

【电压驻波比控件】电压驻波比控件（VSWR）如图 6-15 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路各端口电压驻波比的数据组。

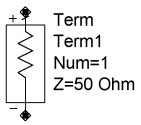


图 6-11　终端负载

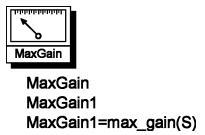


图 6-12　最大增益控件

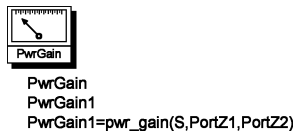


图 6-13　功率增益控件

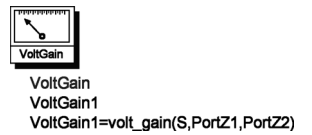


图 6-14　电压增益控件

【增益波纹控件】增益波纹控件（GainRip）如图 6-16 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路增益波纹的数据组。

【输入导纳控件】输入导纳控件（Yin）如图 6-17 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路输入导纳的数据组，用户在仿真结束后可以直接在数据显示窗口中查看仿真电路或仿真网络的输入导纳。

【输入阻抗控件】与输入导纳功能类似，输入阻抗控件（Zin）如图 6-18 所示，用来在仿真结果中添加仿真电路输入阻抗的数据组。

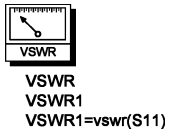


图 6-15　电压驻波比控件

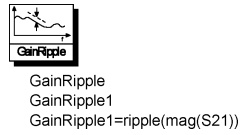


图 6-16　增益波纹控件

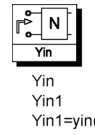


图 6-17　输入导纳控件

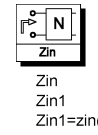


图 6-18　输入阻抗控件

【史密斯圆图控件】史密斯圆图是射频电路分析中最有效和最直观的工具，ADS 提供各种史密斯圆图工具，例如各种增益圆图、噪声系数圆图和稳定性圆图等。用户可以在原理图中通过这些控件计算相应数据，并将这些数据添加到仿真结果中。史密斯圆图控件面板如图 6-19 所示。

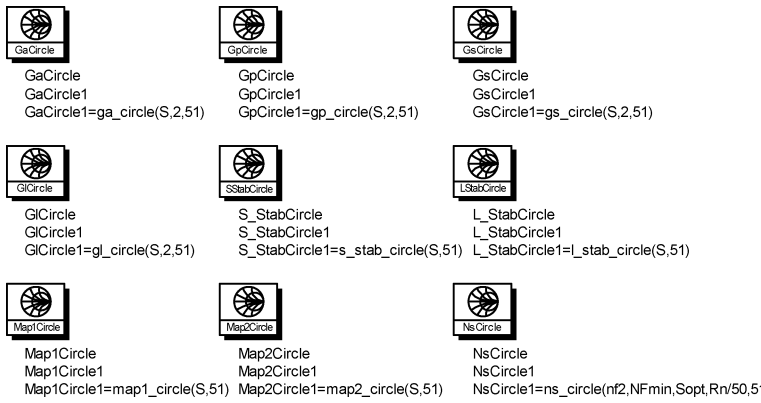


图 6-19　史密斯圆图控件面板

6.3　S 参数仿真的一般过程

（1）选择器件模型并建立电路原理图。

（2）确定需要进行 S 参数仿真的输入、输出端口，并在“Simulation-S_Param”元件面板中选择终端负载控件 Term 分别连接在电路的输入、输出端口。

（3）在“Simulation-S_Param”元件面板列表中选择 S 参数仿真控制器 SP，并放置在电路图设计窗口中。

（4）双击 S 参数仿真控制器，在“Frequency”选项卡中对交流仿真中频率扫描类型和扫描范围等进行设置。

（5）如果扫描变量较多，则需要在“Simulation-S_Param”元件面板中选择 Prm Swp 控件，在其中设置多个扫描变量以及每个扫描变量的扫描类型和扫描参数范围等。

（6）如果需要计算电路的群延时特性，则需要在 S 参数仿真控制器参数设置窗口中选择“Parameters”选项卡，在“Calculate”项中选中“Group delay”，允许在仿真中计算群延时参数。

（7）如果需要对电路进行线性噪声分析，则需要在 S 参数仿真控制器参数设置窗口的“Noise”选项卡中选中“Calculate noise”项，允许在仿真中计算线性噪声，然后分别设置噪声的输入端口、输出端口、噪声来源分类方式、噪声的动态范围和噪声带宽等内容。

（8）设置完成后，执行仿真。

（9）在数据显示窗口查看仿真结果。

6.4 ADS 中 S 参数仿真案例

本节通过案例来简单说明 S 参数仿真的一般过程。

1．运放 S 参数仿真

（1）启动 ADS2012 软件，进入 ADS 主窗口，单击查看范例目录图标查看范例名称列表。从范例目录选择，依 RFIC→amplifier_wrk.7zap→SP1→schematic 顺序打开原理图，如图 6-20 所示。

（2）运行仿真，当仿真结束后，在数据显示窗口绘制 S(2,1)参数曲线，如图 6-21 所示。

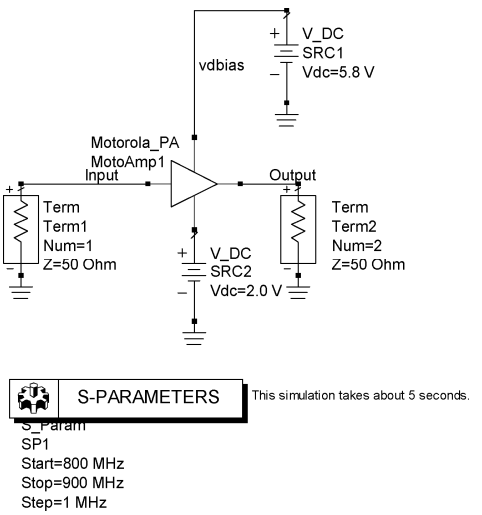


图 6-20 运放 S 参数仿真电路原理图

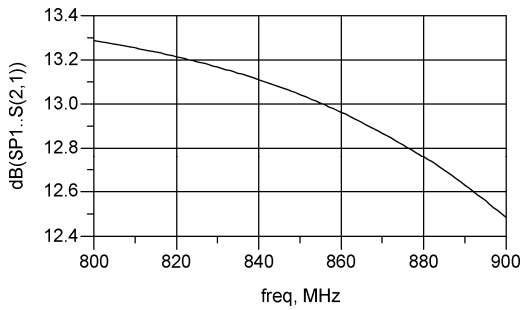


图 6-21 S(2,1)参数仿真曲线

Term 组件默认提供噪声成分（Noise=yes），但是只有当需要时才有效。

2．群延时计算

群延时可以通过测量端口间信号传输时间来得到。对行为特性要求严格的器件（例如放大器和滤波器），通常采用群延时分析相位失真。群延时的仿真步骤为：

（1）双击 S 参数仿真控制器，选择“Parameters”选项卡，在“Calculate”项中选中“Group delay”，在仿真中会计算群延时，如图 6-22 所示。

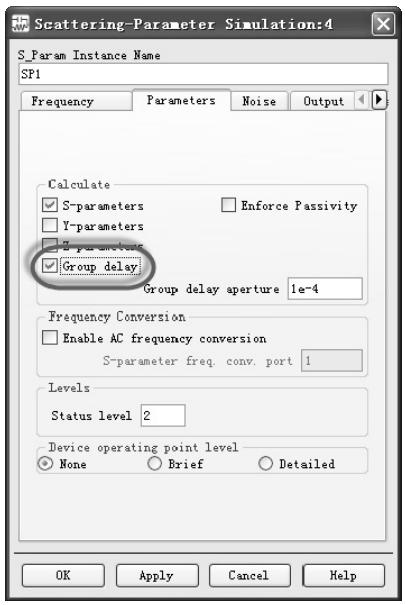


图 6-22　选中“Group delay”

（2）单击工具栏按钮重新执行仿真。仿真结束后，在数据显示窗口中添加矩形图，并选择 delay（2,1）、delay（2,2）作为显示的数据来源，单击 OK 按钮显示相关仿真曲线，如图 6-23 所示。

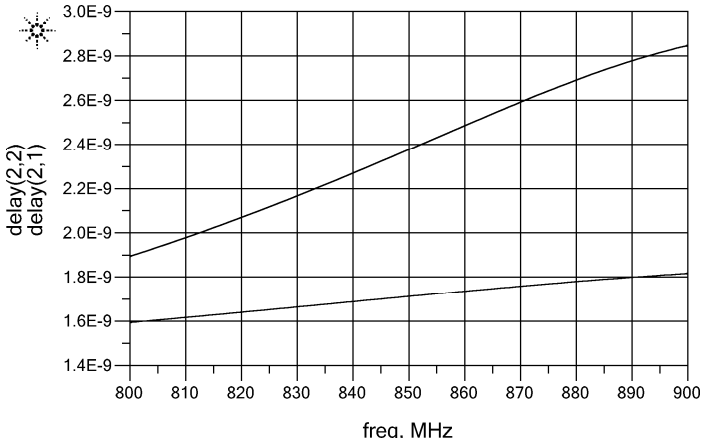


图 6-23　delay(2,1)和 delay(2,2)仿真曲线

3．线性噪声仿真

（1）双击 S 参数仿真控制器，选择“Noise”选项卡，选中“Calculate noise”项，允许在仿真中进行线性噪声计算。

（2）在“Noise input port”中输入 1，表示噪声输入端口为端口 1：在“Noise output port”中输入 2，表示噪声输出端口为端口 2。在“Mode”项中选择噪声源的分类方式为“Sort by value”，按照噪声源产生噪声的大小对噪声源进行分类，如图 6-24 所示。

（3）单击工具栏按钮，重新执行仿真。仿真结束后，在数据显示窗口添加数据列表，并选择“port2.NC.name”和“port2.NC.vnc”作为显示的数据来源，单击 OK 按钮显示端口 2 的噪声相关数据，如图 6-25 所示。



图 6-24 “Scattering-Parameter Simulation”对话框

index	port2.NC.name	port2.NC.vnc
freq=800.0 MHz		
0	_total	314.3 pV
1	MotoAmp1.TL1	168.4 pV
2	MotoAmp1.X2...	160.6 pV
3	MotoAmp1.X2...	160.6 pV
4	MotoAmp1.TL3	91.52 pV
5	MotoAmp1.TL2	77.50 pV
6	MotoAmp1.TL5	45.84 pV
7	MotoAmp1.X2...	27.55 pV
8	MotoAmp1.X2...	27.55 pV
9	MotoAmp1.TL6	19.53 pV
10	MotoAmp1.V5	17.59 pV
11	MotoAmp1.TL4	12.09 pV
12	MotoAmp1.V3	3.485 pV
freq=801.0 MHz		
0	_total	314.4 pV
1	MotoAmp1.TL1	168.4 pV
2	MotoAmp1.X2...	160.7 pV
3	MotoAmp1.X2...	160.7 pV
4	MotoAmp1.TL3	91.53 pV
5	MotoAmp1.TL2	77.52 pV
6	MotoAmp1.TL5	45.88 pV
7	MotoAmp1.X2...	27.59 pV
8	MotoAmp1.X2...	27.59 pV
9	MotoAmp1.TL6	19.52 pV
10	MotoAmp1.V5	17.62 pV
11	MotoAmp1.TL4	12.14 pV
12	MotoAmp1.V3	3.504 pV

图 6-25 输出端口的噪声相关数据

6.5 S 参数仿真实例

本节将通过实例进一步强调 S 参数仿真过程中参数设置、运行、优化以及数据输出等相关内容，使读者对 S 参数仿真有更全面的认识。

6.5.1 基本 S 参数仿真

1．创建原理图

（1）新建项目空间，命名为 chapter6_wrk，其他选项默认。

（2）新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为“s_params”，参照交流仿真原理图，绘制 S 参数仿真原理图。

（3）在“Simulation-S_Param”组件面板中，插入终端负载（Term）。

（4）在“Lumped-Components”组件面板中，插入两个理想扼流圈 DC_feed 以隔离 RF 与直流通路。

（5）在“Lumped-Components”组件面板中，插入两个隔直电容 DC_Block 器件。

（6）在“Simulation-S_Param”组件面板中，在原理图上放置控件，参数设置为：

☺ Start=100MHz;

☺ Stop=4GHz;

☺ Step=100MHz。

（7）完整电路原理图如图 6-26 所示。

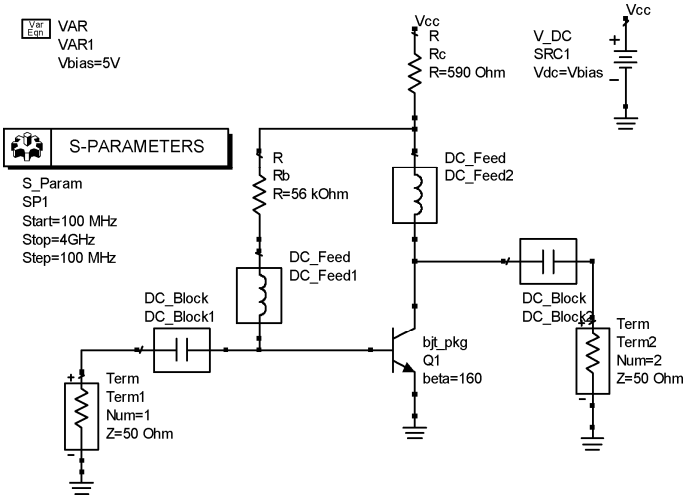


图 6-26　理想元件仿真电路原理图

2．仿真结果输出

（1）单击仿真按钮，进行仿真。

（2）仿真结束后，引入 S21（dB）的矩形图，在 1 900MHz 处插入标记，如图 6-27 所示，确认此处增益为 20dB。

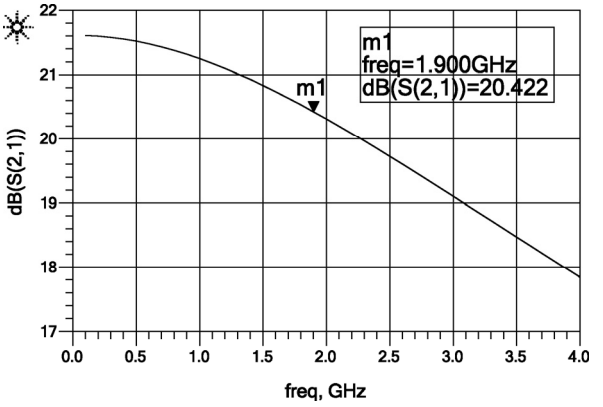


图 6-27　以 dB 为单位 S(2,1)参数曲线

（3）单击数据显示窗口左侧工具栏图标引入 S11 和 S22 的史密斯圆图（Smith Chart），并在 1 900MHz 处插入标记。

（4）选中标记读出器（marker readout），按方向键可移动标记。从图 6-28 中可知，由于还没有对该电路输入、输出进行匹配，S11 和 S22 的结果很差，S11 在 1.9GHz 处的大小以及它的阻抗值没有匹配，若完全匹配应该在 50Ω 附近。

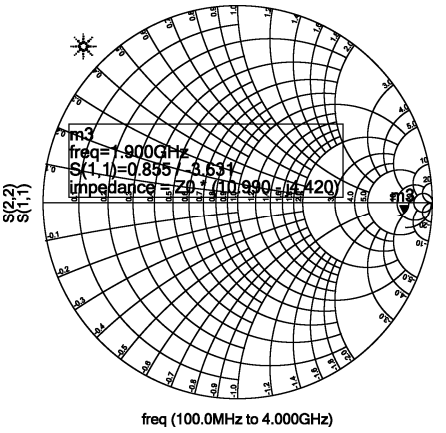


图 6-28　S11、S22 参数 Smith 圆图

（5）双击标记读出器弹出如图 6-29 所示的编辑标记属性窗口，在“Format”选项卡中把 Zo 改为 50Ω，单击 OK 按钮，得到新的结果，如图 6-30 所示。

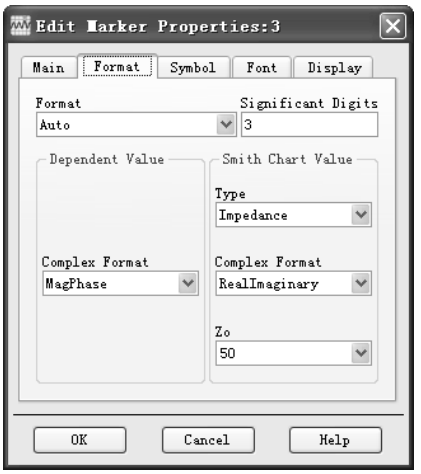


图 6-29　编辑标记属性窗口

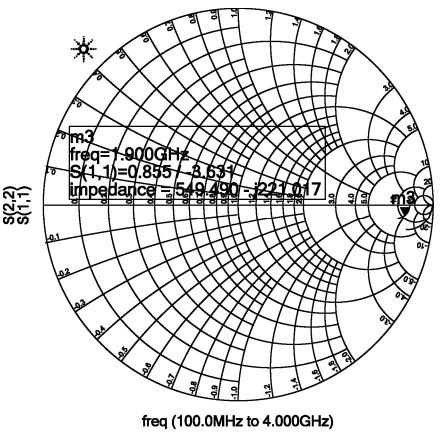


图 6-30　50Ω 阻抗替换后的 Smith 圆图

3．写出改变终端阻抗的方程

（1）在原理图中对端口 2 写方程，这样可以更灵活地定义参数和变量，使其终端 Z 在频率小于 400MHz 时负载阻抗为 50Ω，大于 400MHz 时阻抗为 35Ω，即 Z=if freq<400MHz then 50 else 35 endif，如图 6-31 所示。

（2）运行仿真，在数据显示窗口单击按钮，输出 PortZ（2）以数据列表（list）形式显示。检查在频率大于 400MHz 时 Z 是否为 35Ω，从图 6-32 中可以看出，当频率大于等于

400MHz 时负载阻抗为 35Ω。

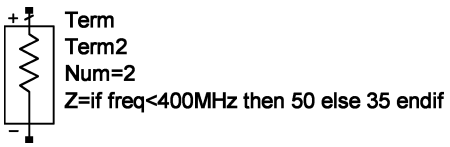


图 6-31　阻抗可变器件模型

freq	PortZ(2)
100.0 MHz	50.000 / 0.000
200.0 MHz	50.000 / 0.000
300.0 MHz	50.000 / 0.000
400.0 MHz	35.000 / 0.000
500.0 MHz	35.000 / 0.000
600.0 MHz	35.000 / 0.000
700.0 MHz	35.000 / 0.000
800.0 MHz	35.000 / 0.000
900.0 MHz	35.000 / 0.000
1.000 GHz	35.000 / 0.000
1.100 GHz	35.000 / 0.000
1.200 GHz	35.000 / 0.000
1.300 GHz	35.000 / 0.000
1.400 GHz	35.000 / 0.000
1.500 GHz	35.000 / 0.000
1.600 GHz	35.000 / 0.000
1.700 GHz	35.000 / 0.000
1.800 GHz	35.000 / 0.000
1.900 GHz	35.000 / 0.000
2.000 GHz	35.000 / 0.000
2.100 GHz	35.000 / 0.000
2.200 GHz	35.000 / 0.000
2.300 GHz	35.000 / 0.000
2.400 GHz	35.000 / 0.000
2.500 GHz	35.000 / 0.000
2.600 GHz	35.000 / 0.000
2.700 GHz	35.000 / 0.000
2.800 GHz	35.000 / 0.000
2.900 GHz	35.000 / 0.000
3.000 GHz	35.000 / 0.000

图 6-32　不同频率对应阻抗值列表

（3）把端口 2 阻抗重置到 Z=50Ω。

4．在数据显示窗口中计算感抗、容抗值

在图 6-26 所示的电路中，DC_Block 和 DC_Feed 都是理想器件，而实际电路是用电感代替扼流圈，用电容代替 DC_Block，接下来完成的是计算电容的容抗值和电感的感抗值。

（1）插入方程计算 XC。在数据显示窗口单击Eqn图标，插入方程，计算 1 900MHz 处 10pF 的容抗。然后列表输出 XC，如图 6-33 所示，计算后结果为-8.377，这个电抗值比较小，在 1 900MHz 交流信号时可以近似看作短路器件。

（2）改变方程中的电容值为 20pF，XC 列表将自动刷新为-4.188，如图 6-34 所示。

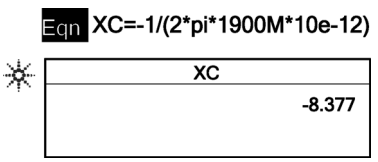


图 6-33　容抗方程及容抗值

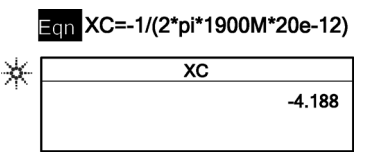


图 6-34　改变后容抗方程及容抗值

（3）插入列表，显示电感值和感抗范围。其中 L_val 的范围为 0～200nH，步长为 10nH，如图 6-35 所示。

图 6-35 中，两个冒号句法表示范围，方括号用于生成扫描。随着电感值增加，1.9GHz 处的感抗值也增加。因此，120nH 对于 DC 馈电已足够大（RF 扼流圈）。可将方程和表格复制至另一数据显示窗口或者使用命令【File】→【Save As Template】以模板格式保存数据显示文件，这样可被其他窗口引用。

Eqn XL=2*pi*1900M*L_val

Eqn L_val=[0n::10n::200n]

L_val	XL
0.000	0.000
1.000E-8	119.381
2.000E-8	238.761
3.000E-8	358.142
4.000E-8	477.522
5.000E-8	596.903
6.000E-8	716.283
7.000E-8	835.664
8.000E-8	955.044
9.000E-8	1074.425
1.000E-7	1193.805
1.100E-7	1313.186
1.200E-7	1432.566
1.300E-7	1551.947
1.400E-7	1671.327
1.500E-7	1790.708
1.600E-7	1910.088
1.700E-7	2029.469
1.800E-7	2148.849
1.900E-7	2268.230
2.000E-7	2387.610

图 6-35　感抗方程及对应感抗值

（4）保存当前的数据显示文件和原理图。

5．代入 *L* 和 *C* 的计算值并仿真

（1）另存原理图，命名为 s_match。

（2）把两个隔直电容的文件名 DC_Block 改为 C，它们将自动变为集总参数电容，并把两电容值均设为 *C*=10pF，如图 6-36 所示。

（3）以相同方式改变理想电感（DC_Feed），并把值都设为 *L*=120nH，如图 6-37 所示。

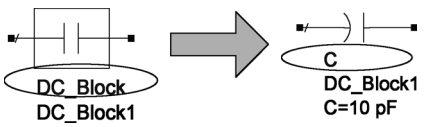


图 6-36　器件替换方法

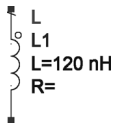


图 6-37　实际的电感

（4）连接好原理图，如图 6-38 所示，检查各元件值并仿真。

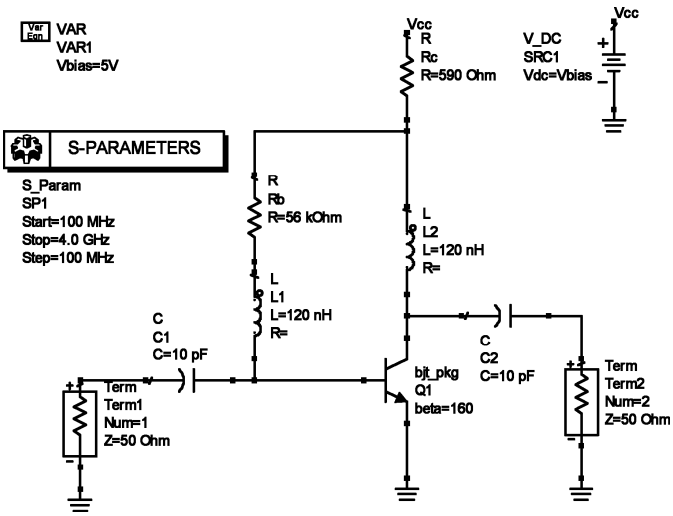


图 6-38　仿真电路图

（5）在数据显示窗口中，对传输参数（S12 和 S21）和反射参数（S11 和 S22）仿真数据绘图并作标记，如图 6-39 所示。

> 增益曲线比较平坦，泄漏也适当，但阻抗并未匹配。在下一步骤中，对输入进行调谐使输出阻抗为 50Ω，并对输出进行优化处理与 50Ω 负载匹配。

（6）重新绘制 S11、S22 的 Smith 圆图，并进行阻抗替换，如图 6-40 所示。

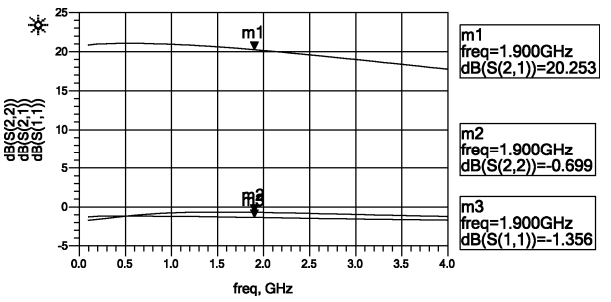


图 6-39　以 dB 显示 S(1,1)、S(2,1)、S(2,2)仿真结果

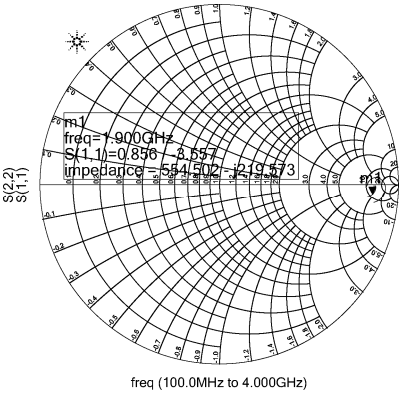


图 6-40　S11、S22 的 Smith 圆图仿真结果

6.5.2　匹配电路设计

从图 6-39 可以看出，该电路阻抗没有匹配，一般在 ADS 中利用 Smith 圆图工具完成匹配工作。

1．启动 Smith 圆图工具

在原理图窗口单击【DesignGuide】→【Filter】→【Smith Chart…】，如图 6-41 所示，弹出 Smith 圆图工具窗口，如图 6-42 所示。

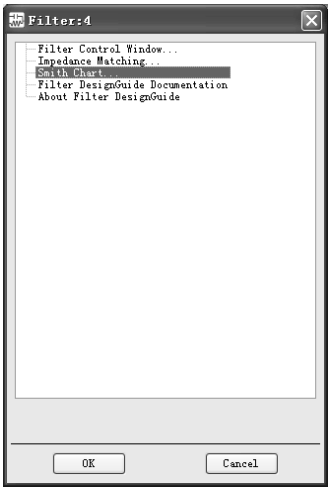


图 6-41　调用 Smith Chart 工具

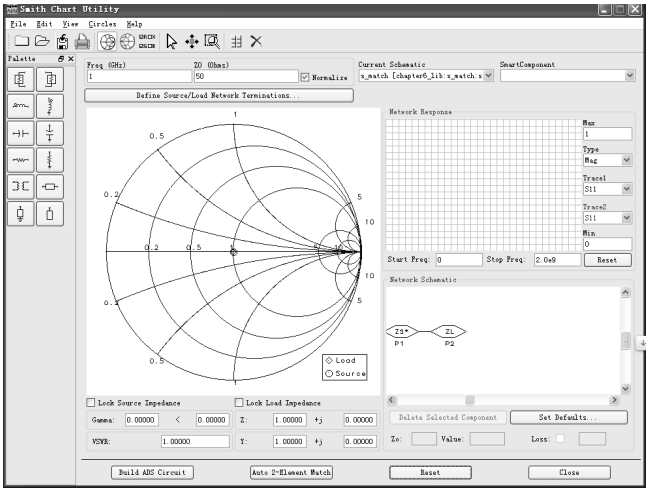


图 6-42　Smith 圆图工具窗口

2．输入端阻抗匹配

（1）在 Smith 圆图工具界面，单击 Palette按钮，原理图的元件控制面板变成“Smith Chart Matching”类，单击 Smithchart 控件，将其放到需要匹配的原理图中，如图 6-43 所示。

（2）在 Smith 圆图工具界面，设置仿真频率和归一化阻抗，如图 6-44 所示。频率设置为 1.9GHZ，归一化阻抗设置为 50Ω。

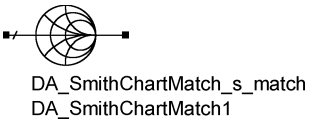


图 6-43　Smith 圆图控件

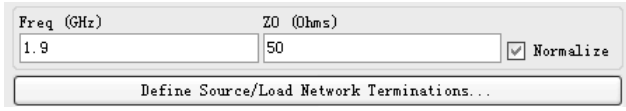


图 6-44　频率和归一化阻抗设置

（3）在 Smith 圆图工具界面，找到“Network Schematic”区域单击 ZL 负载，弹出“SmartComponent Sync”对话框，如图 6-45 所示，选择“Update SmartComponent from Smith Chart Utility”，单击OK按钮。

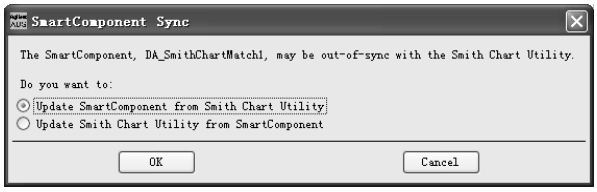


图 6-45 “SmartComponent Sync”对话框

（4）将阻抗值设置为实际的阻抗值。在 1.9GHz 时实际的负载阻抗值为 554.502 -j219.573，如图 6-46 所示。

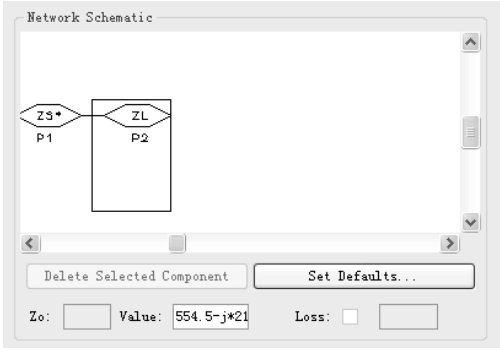


图 6-46　阻抗匹配模型图

（5）在 Smith 圆图上对应出现该阻抗的位置点，如图 6-47 所示。

（6）沿着等电导圆向下移动该位置点，相当于并联一个电容，单击左侧控件，如图 6-48 所示，连接到等电阻圆上。

（7）然后再沿着等电阻圆移动，相当于串联一个电感，单击左侧控件，沿等电阻圆移动到中心点的位置，即达到匹配点，如图 6-49 所示。

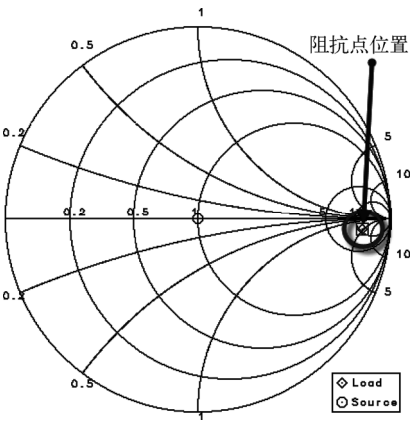


图 6-47　没有阻抗匹配前的 Smith 圆图

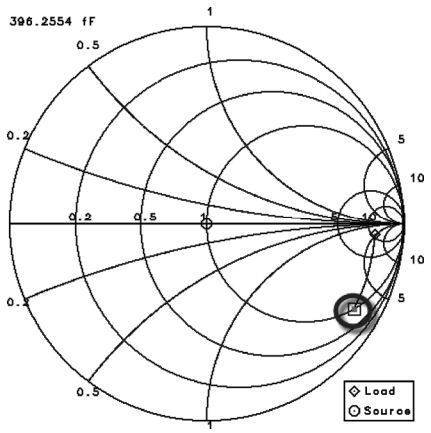


图 6-48　等电导圆匹配

（8）得到匹配网络 S11 参数曲线，如图 6-50 所示。

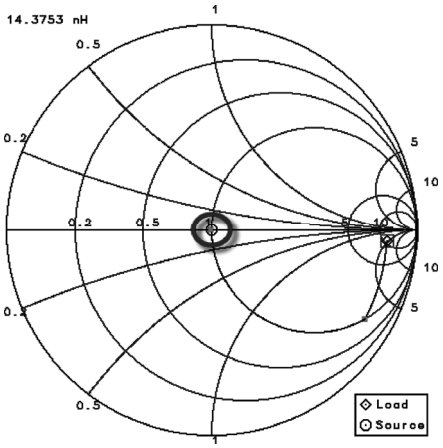


图 6-49　等电阻圆匹配

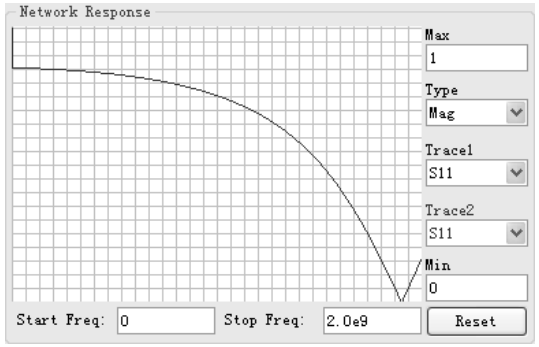


图 6-50　匹配网络 S11 参数曲线

（9）将频率范围改成 0～3.8GHz，单击 Reset 按钮，这时 S11 参数曲线变为如图 6-51 所示形状，匹配网络结构如图 6-52 所示。

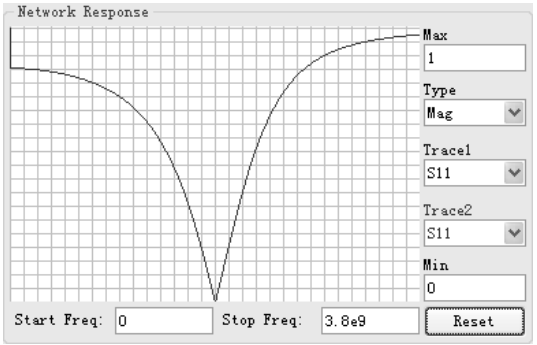


图 6-51　范围变大后匹配网络 S11 参数曲线

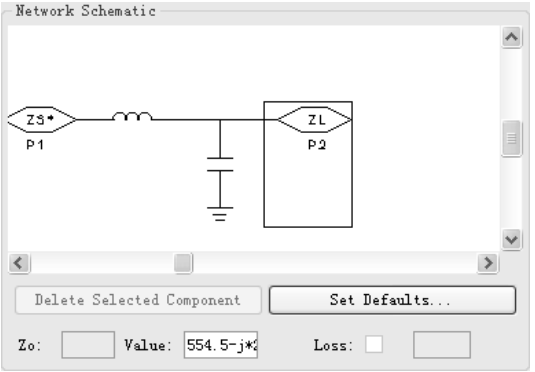


图 6-52　输入端负载匹配网络形式

（10）单击电容或电感，下面对话框会显示出它的值，如电感值为 14.375 3nH，电容为 398.597 43fF。

（11）匹配完成后，单击 Build ADS Circuit 按钮，插入的 Smith 圆图控件完成更新，如图 6-53 所示。

（12）选中该控件，单击图标，进入子电路，图 6-54 所示是步骤（9）所建的匹配电路。

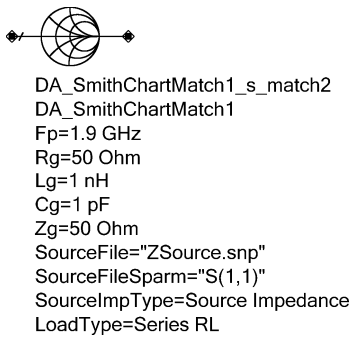


图 6-53　匹配后的 Smith 圆图控件

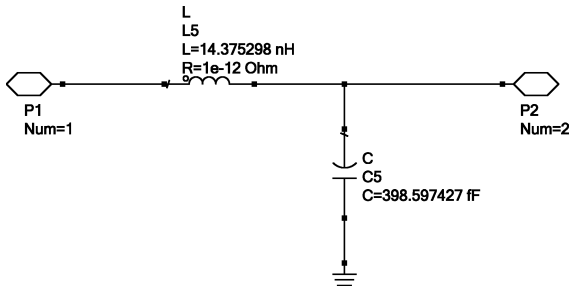


图 6-54　输入匹配电路图

（13）将该控件直接接入电路输入端，如图 6-55 所示，也可以进入它的子电路把它的电路结构和参数值复制后，接到电路输入端，如图 6-56 所示。

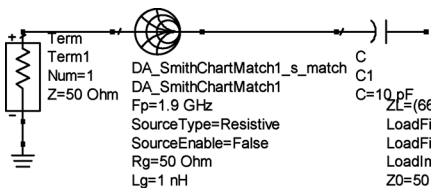


图 6-55　控件直接接入电路

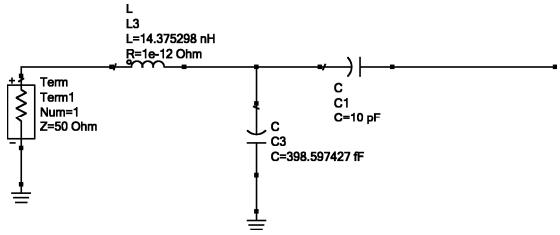


图 6-56　匹配网络子电路接入电路

（14）单击仿真按钮，进行仿真。

（15）仿真结束后，添加 S11、S21、S22 数据显示，如图 6-57 所示，从图中可以看出，S11 在 1.9GHz 工作频率时为-45.732dB，输入端已经达到匹配，S22 在 1.9GHz 工作频率时为-0.428dB 仍然很差，输出端没有匹配。

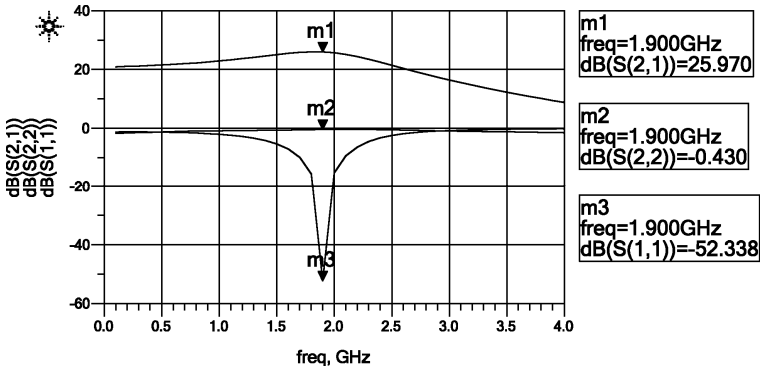


图 6-57　S11、S21、S22 参数仿真曲线

3．输出端阻抗匹配

（1）单击数据显示窗口左侧工具栏图标引入 S11 和 S22 的 Smith 圆图，并在 1 900MHz 处插入标记，如图 6-58 所示。

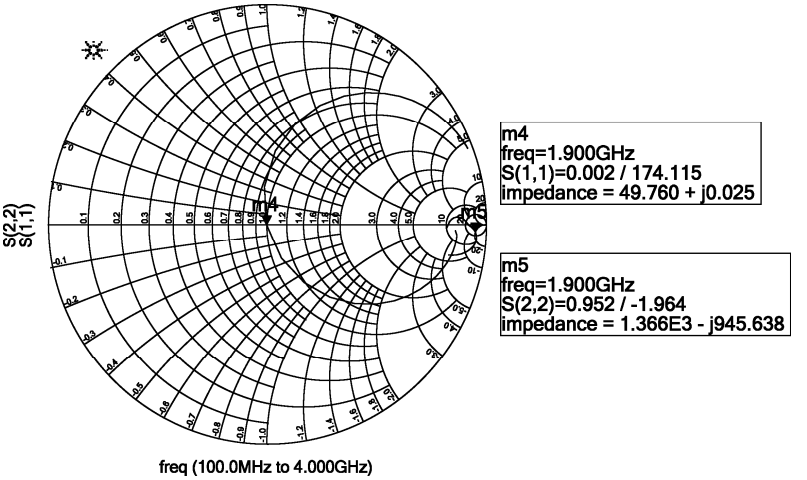


图 6-58　S22 的 Smith 圆图仿真结果

（2）查看图 6-58 所示的 Smith 圆图，S22 实际的阻抗值大小为 1.366E3-j945.638，利用输入匹配的方法完成输出匹配，得到的结果如图 6-59 所示。

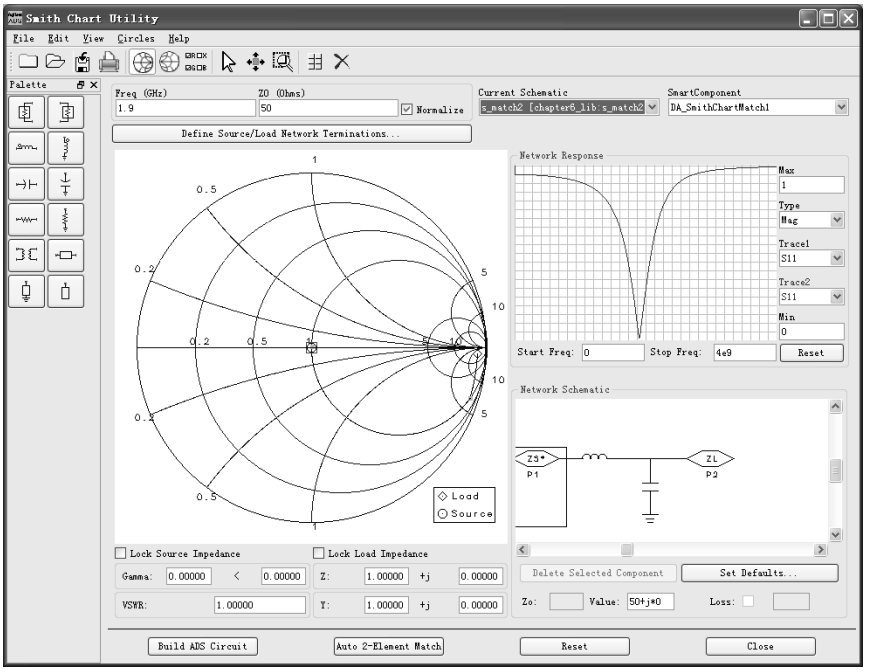


图 6-59　输出端负载匹配最后结果

（3）输出端匹配子电路如图 6-60 所示，P2 端为负载端，将其连接到电路原理图时，要注意连接方式，如图 6-61 所示。

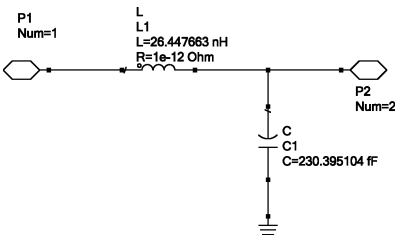


图 6-60　输出端匹配子电路

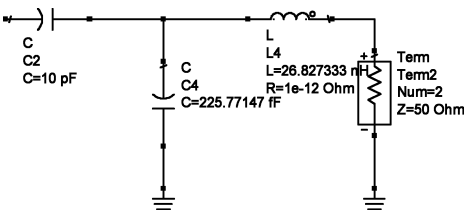


图 6-61　电路与负载连接方式

（4）全部匹配电路设计完成，如图 6-62 所示。

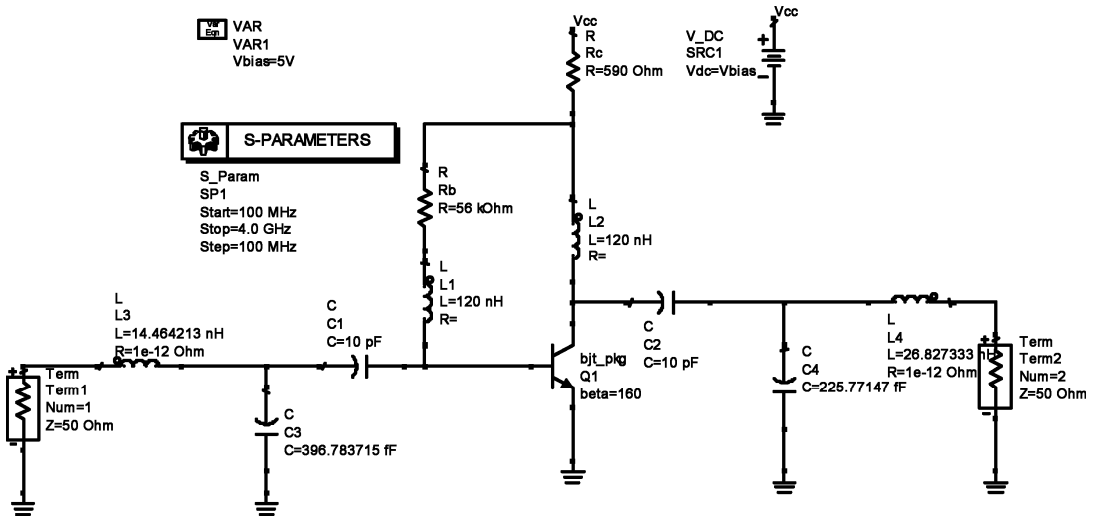


图 6-62　输入、输出匹配电路

（5）单击仿真按钮，进行仿真。仿真结束后，添加 S11、S21、S22 数据显示，如图 6-63 所示，从图中可以看出，S22 变好了，S21 放大倍数也提高了。

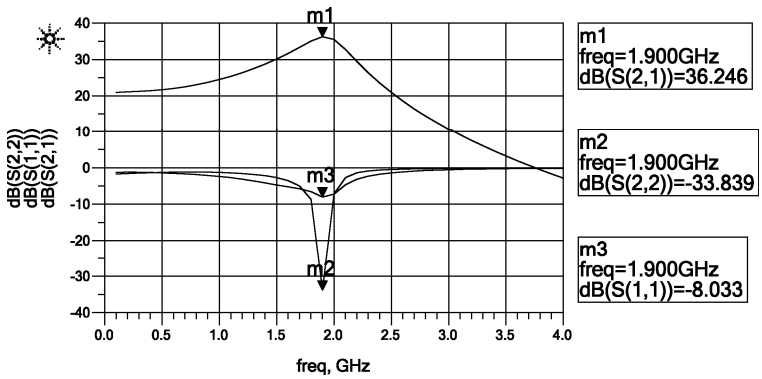


图 6-63　S11、S21、S22 参数仿真结果

建立输入、输出电路匹配用的是 Smith 圆图工具，当然设计该放大器是给读者演示如何进行电路匹配设计，只考虑了共轭匹配，读者应明确一般放大器第一级考虑的是低噪声匹配，这也是匹配电路设计的内容。

6.5.3　参数优化

匹配电路建立好之后，仿真结果如图 6-63 所示，尽管 S22 达到了指标要求，但 S11=-8.033dB，没有达到要求的目标，这时需要用 ADS2012 的参数优化功能，进一步完善电路设计。

（1）另存图 6-63，命名为 s_opt。选择“Optim/Stat/Yield/DOE”类元件面板，插入 Optimization Controller（优化控制器）和 Goal（优化目标）控件，如图 6-64 所示。

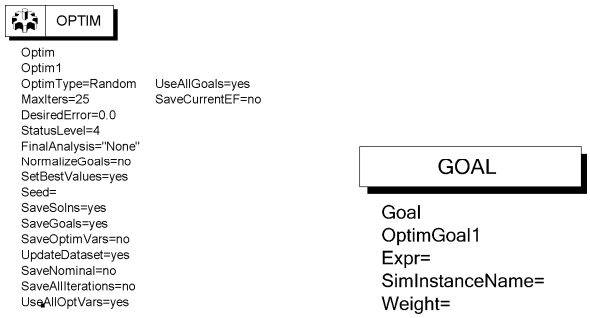


图 6-64　优化控制器及优化目标控件

（2）双击 GOAL 控件，出现如图 6-65 所示的对话框。在对话框中输入设置，全部完成后单击 OK 按钮，S11 优化目标控件如图 6-66 所示。



图 6-65　优化目标控件设置窗口

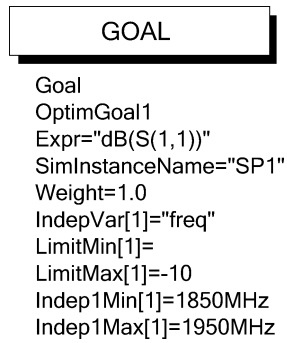


图 6-66　S11 优化目标控件

（3）选中 GOAL 控件，单击工具栏 Copy 图标，复制另外两个 Goal 控件。分别改变 Goal 表达式为“dB(S(2,2))”及“dB(S(2,1))”，如图 6-67 所示。

（4）可以保留 Optim 控件参数大多数默认值，如图 6-68 所示。修改 MaxIters=125，FinalAnalysis=“SP1”。

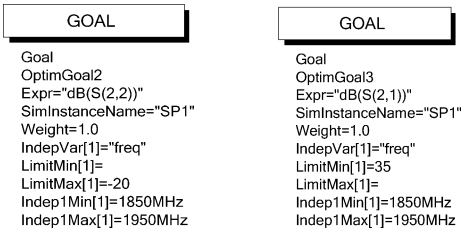


图 6-67　S22 及 S21 优化目标控件

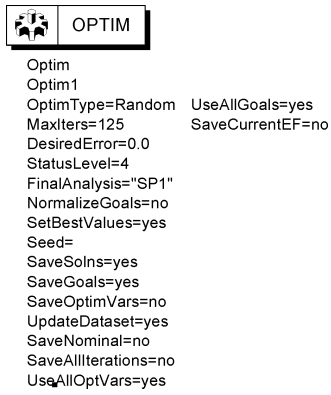


图 6-68　设置后的 Optim 控制器

（5）双击电感 L3，出现如图 6-69 所示的对话框，单击 Tune/Opt/Stat/DOE Setup... 按钮，弹出如图 6-70 所示的窗口，在“Optimization”选项卡中，将“Optimization Status”设置为“Enabled”，输入电感优化范围从 1nH 到 40nH，设置后电感优化变量如图 6-71 所示。单击 OK 按钮，元件文本框显示 opt 函数和范围，如图 6-72 所示。

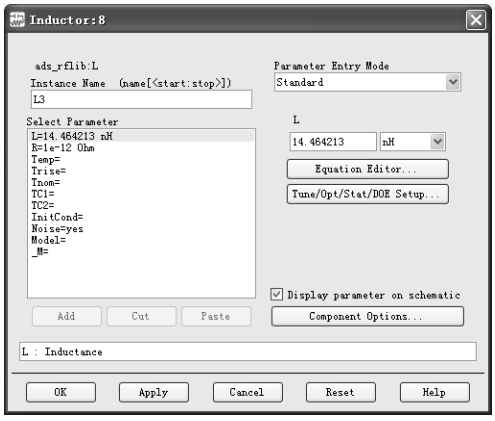


图 6-69　设置电感优化变量

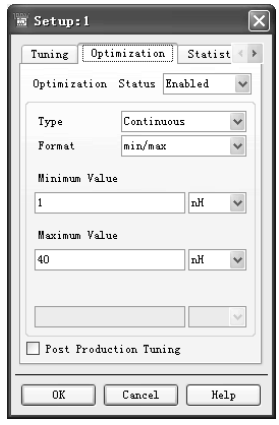


图 6-70　设置“Optimization”选项卡

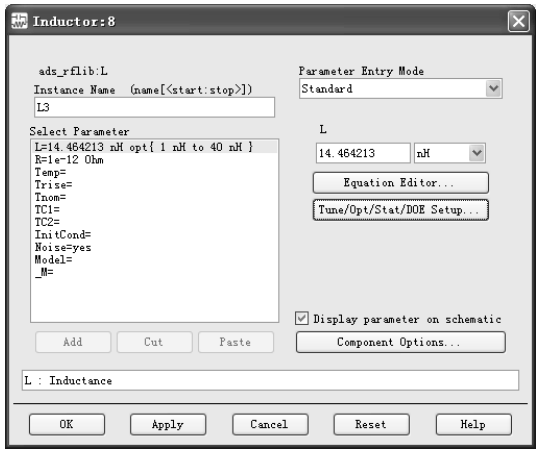


图 6-71　设置后电感优化变量

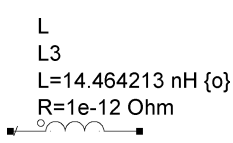


图 6-72　设置优化后电感

（6）用同样方法对电容 C3、C4 及电感 L4 进行优化参数设置，其中，电容 C3 优化范围为 10～1 000fF，电感 L4 优化范围为 1～40nH，电容 C4 优化范围为 10～1 000fF，如图 6-73 所示。

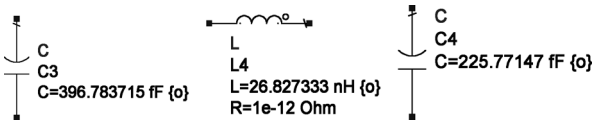


图 6-73　设置优化后器件

（7）优化设置后，完整电路如图 6-74 所示。

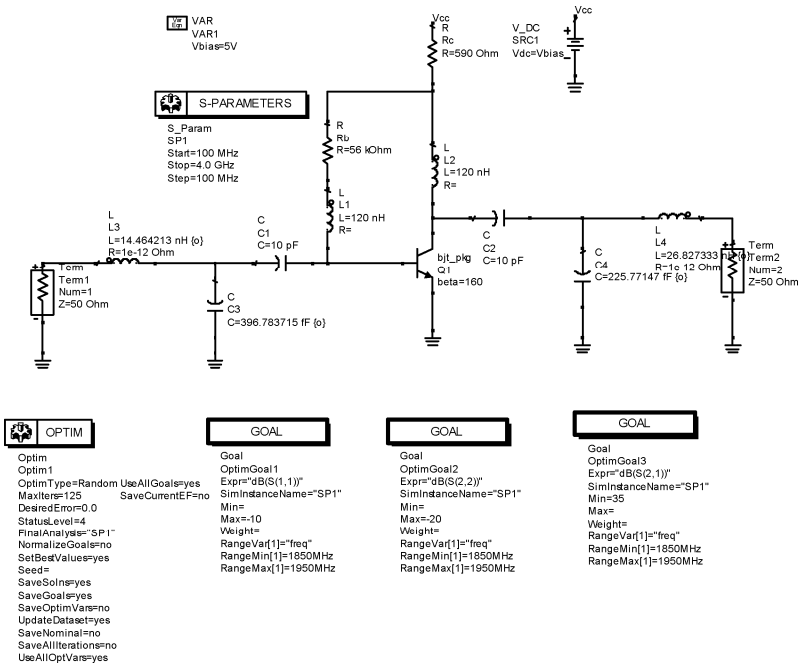


图 6-74　优化设置后电路原理图

（8）单击仿真优化按钮进行优化仿真。在优化仿真过程中，弹出优化仿真窗口，如图 6-75 所示，显示出当前的优化状态，同时弹出优化仿真状态窗口，如图 6-76 所示。

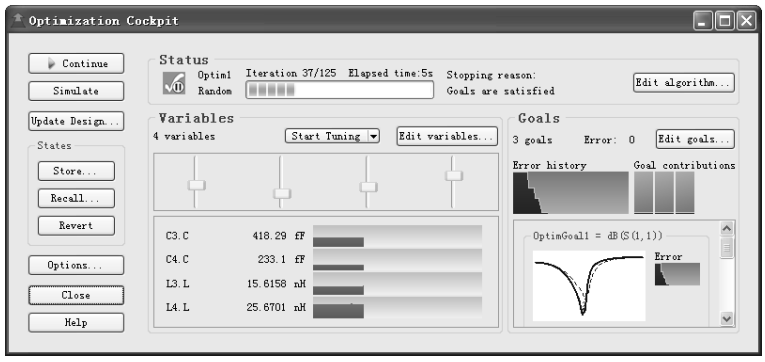


图 6-75　优化仿真窗口

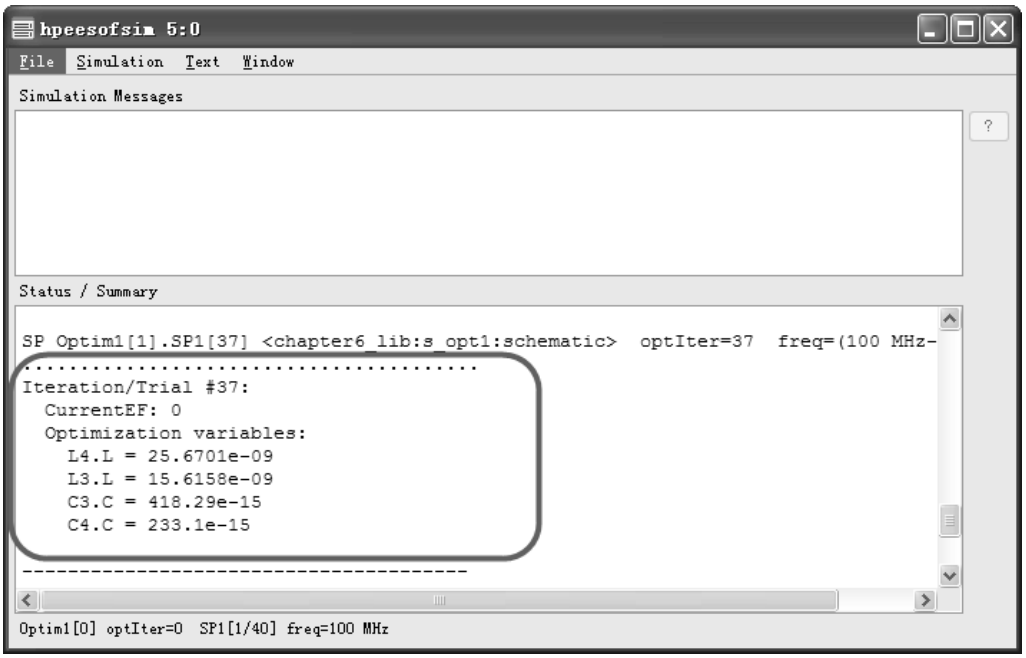


图 6-76　优化仿真状态窗口

> 每次优化迭代运算都会改变 CurrentEF（误差函数）的值，当 CurrentEF=0 或接近 0 时，则满足优化目标。同时，列出各优化变量的最优值。若优化仿真结束后，EF≠0，则可以采取检查原理图结构与参数，增加迭代次数或降低目标等措施重新仿真。

（9）在数据显示窗口插入矩形图，并显示 S11、S21、S22 仿真曲线，单位为 dB，如图 6-77 所示。在数据显示窗口中，插入 Smith 圆图并绘制 S11 和 S22 仿真曲线，同时，利用 Z_o=50Ω 进行阻抗替换，如图 6-78 所示。

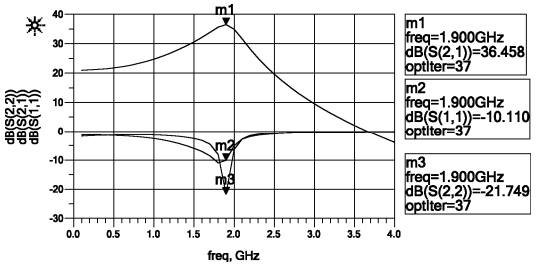


图 6-77　S11、S21、S22 优化仿真结果

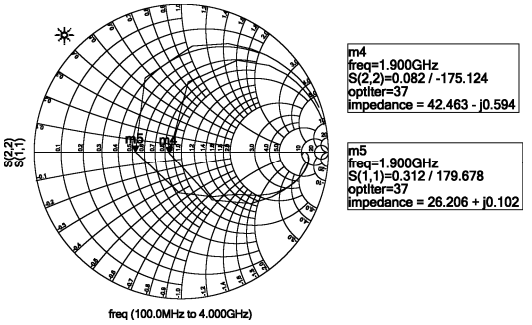


图 6-78　优化作 S11、S22 Smith 圆图仿真曲线

> 端口 1 的输入阻抗为 260.206Ω，与 50Ω有差距，说明端口 1 没有完全匹配。

（10）单击优化窗口的Update Design...按钮，弹出“Update Design”窗口，如图 6-79 所示。将电路中 C3、L3 及 C4、L4 优化变量的值更新为优化值，如图 6-80 所示。

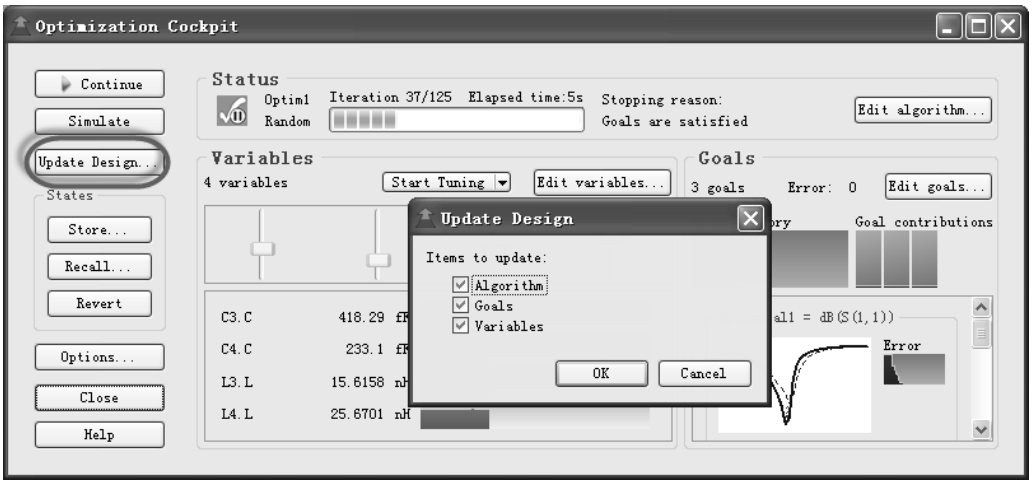


图 6-79　“Update Design”窗口

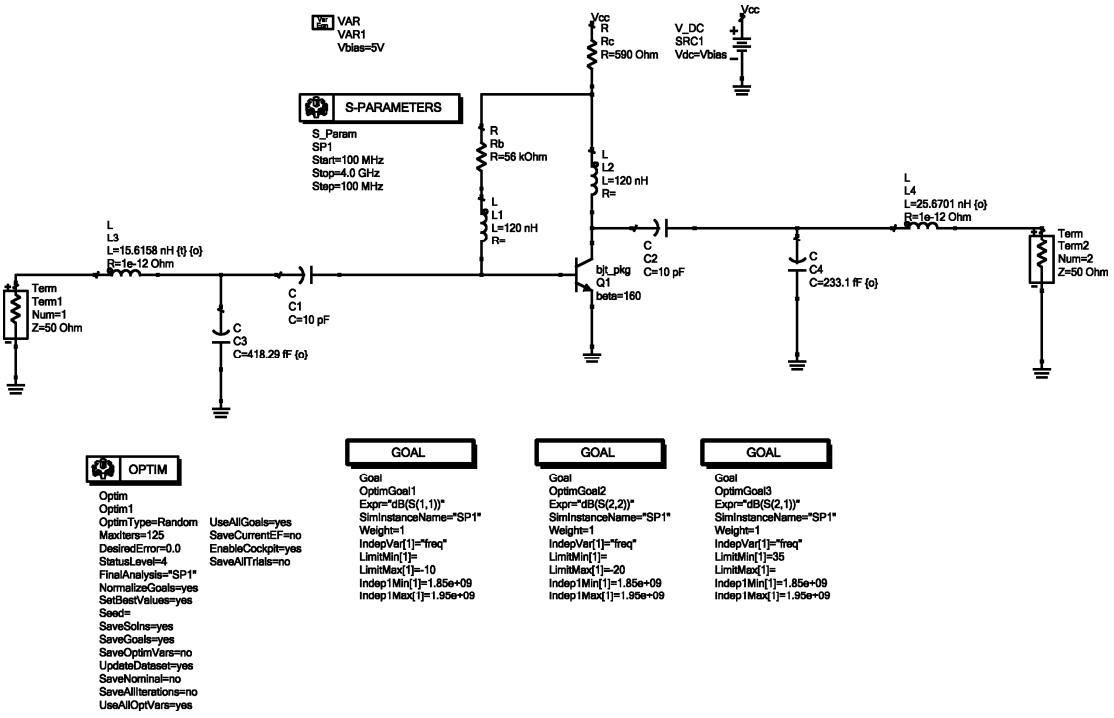


图 6-80　更新优化变量值的电路图

（11）双击电感 L3，弹出对话框，单击 Tune/Opt/Stat/DOE Setup... 按钮，弹出窗口如图 6-81 所示，在“Optimization”选项卡中将电感的“Optimization Status”参数设置为“Disabled”，单击 OK 按钮。

> 完成禁止优化器件后，元件优化函数从 opt 变为 noopt，这意味着该元件将不参与优化。也可以试用在原理图中，单击 L3 插入光标，将 opt 函数改成 noopt 使 L3 不参加优化。

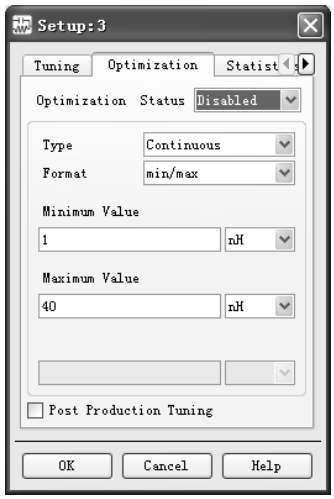


图 6-81　电感优化

（12）保存 s_opt 原理图。

用同样的方法使电容 C3、C4 及电感 L3 禁止优化，同时把优化后的参数与实际标称值器件代换，进行仿真。

【案例 6-1】 对总装匹配电路仿真

（1）另存图 6-80，命名为 s_final。删除（Delete）优化控制器 Options 和目标 Goal 控件。修正 4 个 L 和 C 匹配元件值，为电感添加电阻。这些匹配处理在余下的案例中将用到。继续通过直接在屏幕上输入的方法来改变元件值:

☺ L_3=18.3nH，R=12Ω;

☺ L_4=27.1nH，R=6Ω;

☺ C_3=0.35pF;

☺ C_4=0.22pF。

（2）对新的最终元件值仿真。数据显示窗口打开后，插入 S11、S12、S22 数据，并在 Smith 圆图上对 S11 和 S22 绘图，检查匹配后阻抗在 1 900MHz 处是否接近 50Ω，如图 6-82 和图 6-83 所示。

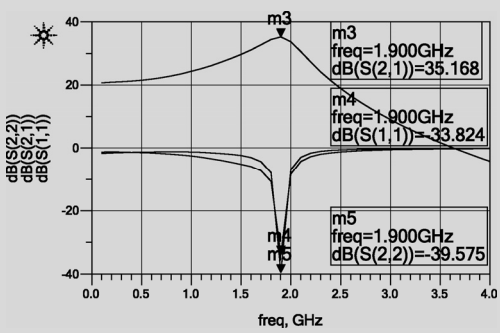


图 6-82　S11、S21、S22 仿真结果

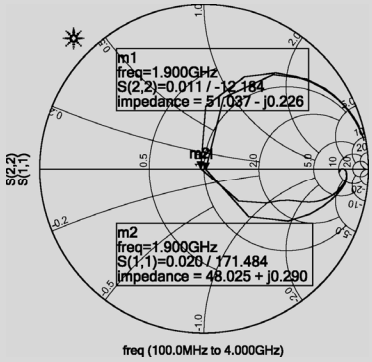


图 6-83　S11、S22 Smith 圆图仿真结果

（3）保存最终设计和数据显示文件。

6.5.4　噪声和增益

【案例 6-2】 带增益和噪声回路的稳态方程

（1）另存 s_final 设计为 s_circles。选择“Simulation-S_Param”类元件面板，插入稳定性测量方程 Mu 和 MuPrime，其中 Mu 为负载端的稳定性系数方程控件，MuPrime 为源端稳定性系数方程控件，如图 6-84 所示，不改变参数，使用默认值。

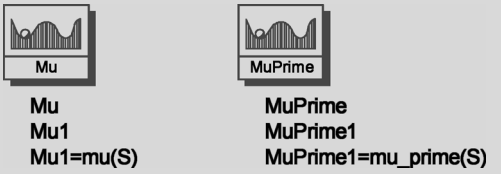


图 6-84　Mu 和 MuPrime 控件

（2）插入 GaCircle 和 NsCircle 两个测量方程，其中 GaCircle 表示等增益圆方程控件，NsCircle 表示等噪声系数圆方程控件，如图 6-85 所示。同时将 GaCircle 控件中的增益系数改为 30dB，NsCircle 控件参数使用默认值。并插入 Options 控制器，令 Temp=16.85 以避免 noise 警告信息，其他设置均可采用默认值，如图 6-86 所示。

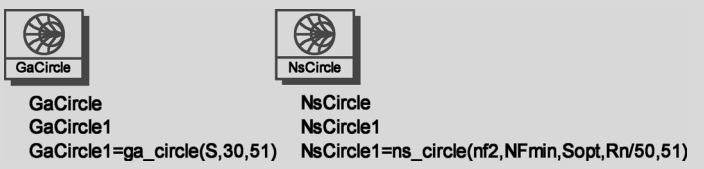


图 6-85　等增益圆和等噪声系数圆方程控件

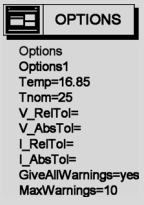


图 6-86　Options 控件

（3）双击 S_Param 控件修改仿真频率范围为 1 850～1 950MHz，以生成较少的数据，并确认噪声计算（noise calculation）是否处于开状态。完整电路图如图 6-87 所示，并开始仿真。

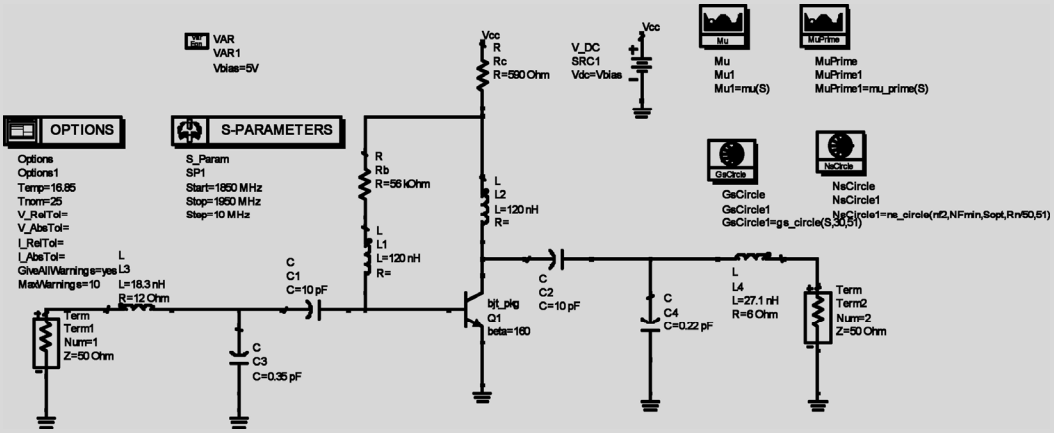


图 6-87　仿真电路原理图

（4）仿真结束后，在数据显示窗口插入 Smith 圆图，显示 NsCircle1 及 GaCircle1 曲线，如图 6-88 所示。

（5）插入矩形图，显示 Mu1 和 MuPrime1 曲线，如图 6-89 所示。

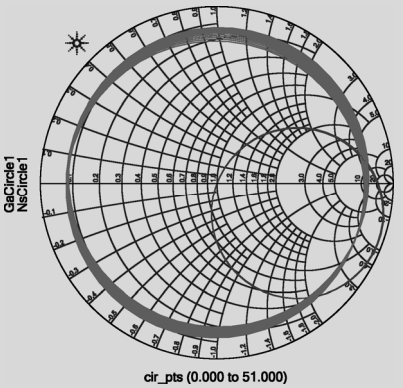


图 6-88　NsCircle1 和 GaCircle1 仿真曲线

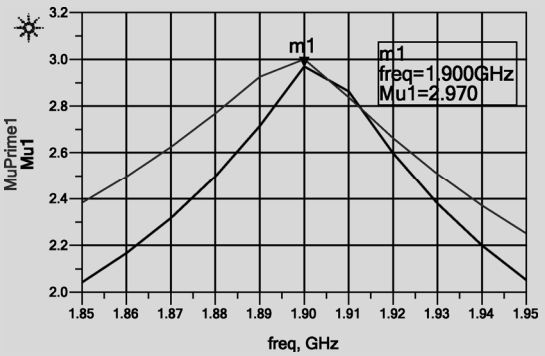


图 6-89　Mu1 和 MuPrime1 仿真曲线

（6）插入列表，添加 nf(2)、NFmin 和 Sopt 的数值，如图 6-90 所示。

freq	NFmin	Sopt	nf(2)
1.850 GHz	1.055	0.788 / -20.779	3.153
1.860 GHz	1.056	0.789 / -20.735	3.171
1.870 GHz	1.056	0.791 / -20.691	3.189
1.880 GHz	1.056	0.792 / -20.646	3.207
1.890 GHz	1.057	0.794 / -20.602	3.225
1.900 GHz	1.057	0.795 / -20.557	3.243
1.910 GHz	1.057	0.797 / -20.512	3.261
1.920 GHz	1.058	0.798 / -20.467	3.280
1.930 GHz	1.058	0.800 / -20.421	3.298
1.940 GHz	1.058	0.801 / -20.376	3.316
1.950 GHz	1.058	0.802 / -20.330	3.335

图 6-90　nf(2)、NFmin 和 Sopt 数据

在 Smith 圆图上增益圆内的区域表示负载阻抗会产生 30dB 增益。噪声圆与它不同，其圆心表示源反射系数的优化值，即最小噪声系数（NFmin），噪声圆圆心也在增益圆内，增益和 NFmin 都可获得。两条曲线 Mu(load)和 MuPrime(Source)其中一个的值要比另一个值大，这表示电路在 100MHz 带宽内是稳定的（不振荡）。最后，nf(2)的列表值是当端口 2 为输出端时的噪声系数。当源反射系数等于 sopt 时（最佳源匹配），其值会更好。

6.5.5　S2P 文件操作

读者可以用 Touchstone、MDIF 或 Citifile 格式读写数据。ADS 可把它支持的数据格式转为 ADS 数据组格式。特别是可将这些数据文件放入任务目录，也可发送至数据目录，因此不管它们位于何处，都可进行控制管理。

【案例 6-3】 S2P 文件读/写 S 参数数据

（1）新建原理图，命名为 s2p_date。如图 6-91 所示，在原理图界面的菜单栏单击【Tools】→【Data File Tool】或在工具栏单击按钮。

（2）弹出对话框，如图 6-92 所示，选中“Write data file from dataset”选项，并在“File format to write”栏选择“Touchstone”格式，将把一个已存在的 ADS 数据组（s_params）写入（转为）一个“Touchstone”文件。

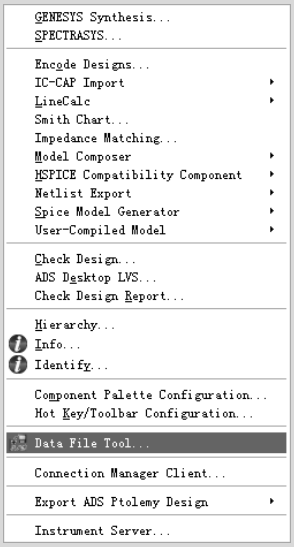


图 6-91　选择菜单



图 6-92　“dftool/mainWindow”对话框

（3）在“Output file name”栏中，输入 my_file.s2p，它将作为从 ADS 数据中转换过来的 Touchstone 格式文件。选择“Complex data format”栏下拉选项“Mag/Angle”。在数据组区域中，“Dataset name”选择 s_params。检查对话框并单击 Write to File 按钮，弹出对话框提示写入成功，如图 6-93 所示。检查状态窗口，如果成功，会看见一条信息，它表示 my_file.s2p 现在是 chapter6 任务的数据目录中的 Touchstone 文件。

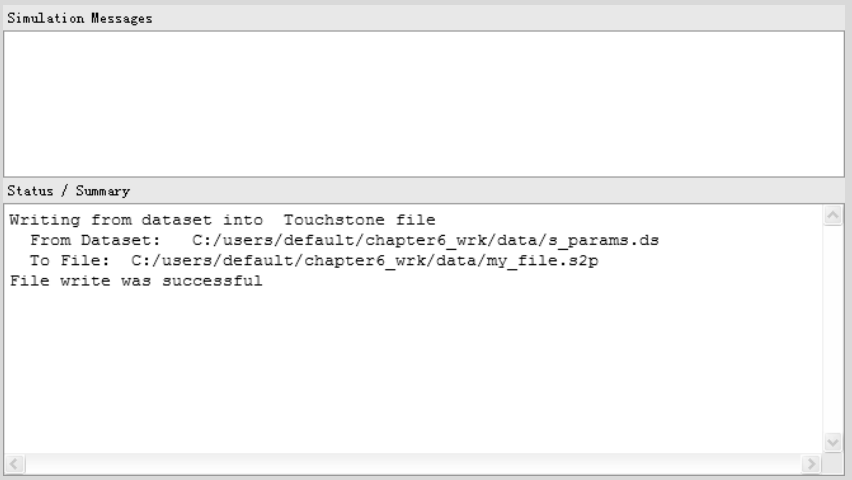


图 6-93　写至文件成功提示

（4）关闭“Data File Tool”窗口。在“Data Items”面板选择 元件，放在原理图适当位置。双击该元件，弹出对话框，如图 6-94 所示。单击 Browse... 按钮，在当前工程下选择 my_file.s2p 并单击 打开(O) 按钮，文件名会自动分配，最后单击 OK 按钮。分配后的元件如图 6-95 所示。

（5）在原理图中，插入 S_Params 模板。在原理图菜单栏单击【Insert】→【Template】选中“S_Params”模板，并将 s2p 文件与接地负载相连，如图 6-96 所示。

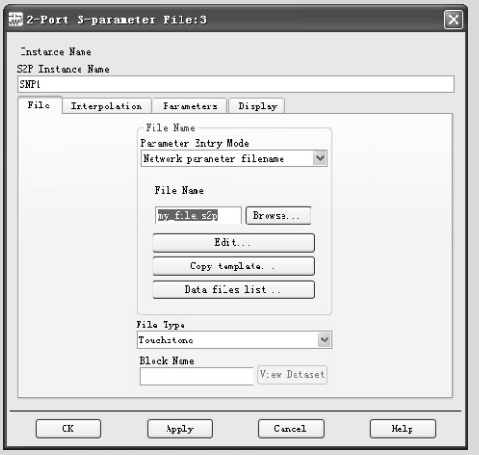


图 6-94　分配 s2p 文件

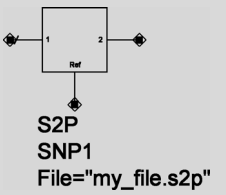


图 6-95　分配后的元件

（6）选择“Simulation-S_param”类元件面板，插入扫描计划控件，并设置 Start=100MHz，Stop=3GHz，步长 Step=100MHz，如图 6-97 所示。扫描计划常用于频率扫描，但是此处可用它在 S 参数仿真控制器中代替频率设置。

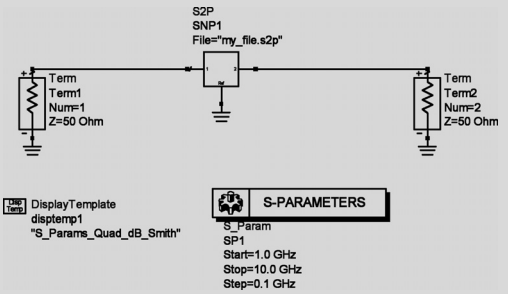


图 6-96　用 s2p 元件连接电路

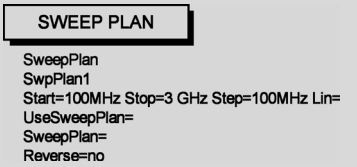


图 6-97　SWEEP PLAN 控件

（7）双击仿真控制器 SP1。在“Frequency”选项卡中，选择 SwpPlan1，如图 6-98 所示，同时确定参数显示，如图 6-99 所示，完成设置的仿真控制器如图 6-100 所示。

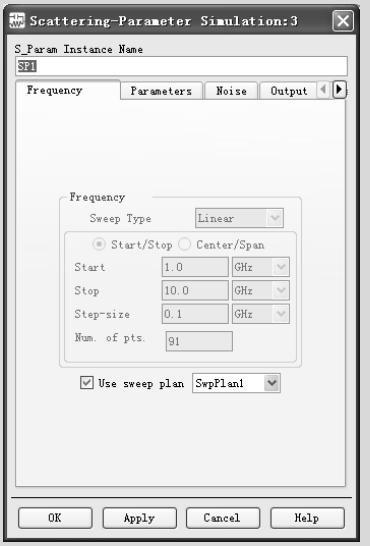


图 6-98　仿真控制器“Frequency”选项卡设置

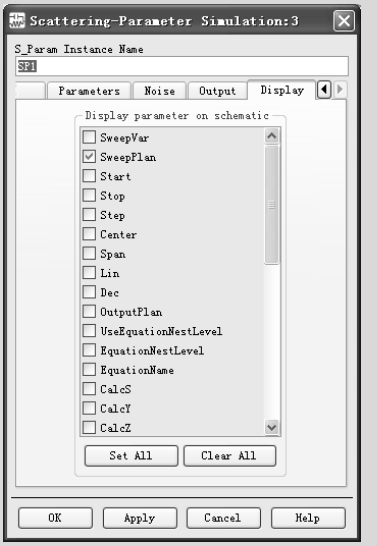


图 6-99　仿真控制器“Display”选项卡设置

（8）单击仿真按钮进行仿真。从“s_params”文件数据组中添加 S21 测量数据，以检查描述数据的 Touchstone 文件是否正确。如图 6-101 所示，在 s2p 仿真的 0 ～3GHz 内两条轨迹完全重合。

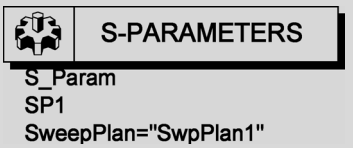


图 6-100　仿真控制器控件

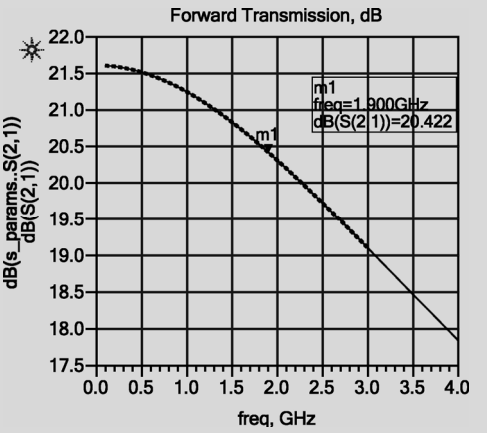


图 6-101　仿真结果（两条轨迹完全重合）

轨迹厚度和类型已经调整，并在 1.9GHz 处加入标记以便两条轨迹更清楚地显示。

6.6　思考题

（1）在一个独立的原理图中，建立一个由图 6-102 中方程描述的阻抗的 S 参数仿真。尝试调整其电路，并对响应进行绘图。注：在“Eqn Based-Linear”面板中插入控件。



图 6-102　阻抗的 S 参数仿真

（2）设计一个具有参数扫描的仿真，要求具有：

☺ 两个或两个以上扫描参数;

☺ 多个扫描计划。

第 7 章　谐波平衡法仿真

谐波平衡法仿真是研究非线性电路的非线性特性和系统失真的频域仿真分析法，一般适合模拟射频微波电路仿真。本章首先介绍谐波平衡法仿真基本原理及相关控件使用情况，然后利用实例详细介绍谐波平衡仿真法的一般相关操作及注意事项。

7.1　谐波平衡法仿真基本原理及功能

在射频电路设计中，通常需要得到射频电路的稳态响应。如果采用传统的 SPICE 模拟器对射频电路进行仿真，通常需要经过很长的瞬态模拟时间电路的响应才会稳定。对于射频电路，可以采用特殊的仿真技术在较短的时间内获得稳态响应，谐波平衡法就是其中之一。

在频域中描述如三极管、二极管等非线性器件是非常困难的，然而，在时域中这些非线性元件很容易得到其非线性模型。因此，在谐波平衡仿真器中，非线性系统用时域描述，用频率描述线性系统，谐波平衡分析法将时域和频域通过 FFT 结合起来，它将电路状态变量近似写成傅里叶级数展开的形式，通常展开项必须取得足够大，以保证高次谐波对于模拟结果的影响可以忽略不计。谐波平衡法在目前的商用 RF 软件中得到了很好的应用，如 ADS、AWR、Hspice、Nexxim 等都支持 HB 分析。

谐波平衡仿真是非线性系统最常用的分析方法，用于仿真非线性电路中的噪声、增益压缩、谐波失真、振荡器寄生、相噪和互调产物，它要比 SPICE 仿真器快得多，可以用来对混频器、振荡器、放大器等进行仿真分析。对放大器而言，采用谐波平衡法分析的目的就是进行大信号的非线性模拟。通过它可以模拟电路的 1dB 输出功率、效率以及 IP3 等与非线性有关的量。谐波平衡法仿真有如下的功能：

- ☺ 确定电流或电压的频谱成分;
- ☺ 计算参数，如三阶截取点、总谐波失真及交调失真分量;
- ☺ 执行电源放大器负载激励回路分析;
- ☺ 执行非线性噪声分析。

7.2　谐波平衡法仿真面板与仿真控制器

ADS 中有专门针对谐波平衡法仿真的元件面板，在“Simulation-HB”类元件面板中包括了所有谐波平衡参数仿真需要的控件，如图 7-1 所示。

主要控件名称如下。

HB：谐波平衡法仿真控制器

Options：谐波平衡法仿真设置控制器

Sweep Plan：参数扫描计划控制器

Prm Swp：参数扫描控制器

Term：终端负载
BudLin：线性化预算分析控件
NoiseCon：谐波噪声控制控件
OscPort：接地振荡器端口元件
OscPort2：差分振荡器端口元件
NdSet：节点设置控件
NdSet Name：节点名控件
Disp Temp：显示模板控件
Meas Eqn：仿真测量等式控件
It：时域电流波形控件
Vt：时域电压波形控件
Pt：功率显示控件
Ifc：频域电流显示控件
Vfc：频域电压显示控件
Pspec：功率谱密度显示控件
IP3in：输入三阶交调点分析控件
IP3out：输出三阶交调点分析控件
IPn：　*N* 阶截止点分析控件
SNR：信噪比分析控件
Bdfreq：频率预算控件
BdGain：增益预算控件
BdGmma：反射系数预算控件
BudPwrl：入射功率预算控件
BdPwrR：反射功率预算控件
BudSNR：信噪比预算控件

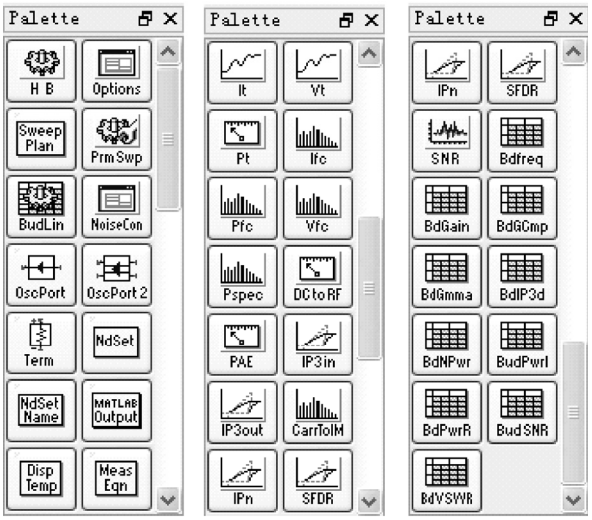


图 7-1　HB 参数仿真面板

1．谐波平衡法仿真控制器

谐波平衡法仿真控制器（HB）如图 7-2 所示，它是控制谐波平衡法仿真的最主要控件，可以设置谐波平衡法仿真的基准频率（Foundamental Frequency）、最高次谐波的次数、扫描参数、仿真执行参数和噪声分析等相关参数。

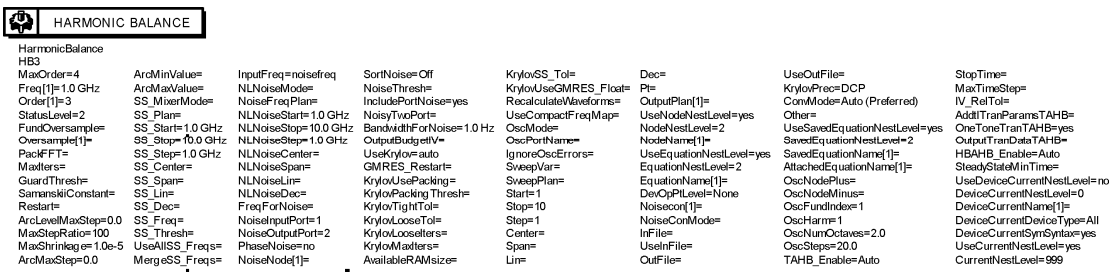


图 7-2　谐波平衡法仿真控制器

双击 HARMONIC BALANCE 图标，弹出谐波平衡法仿真控制器参数设置窗口，主要包括“Freq”、“Sweep”、“Initial Guess”、“Oscillator”、“Noise”、“Small-Sig”、“Params”、“Solver”、“Output”、“Display”10 个选项卡。

【Freq】谐波平衡法仿真需要设置仿真执行时的基准频率和高次谐波等相关参数，用户可以通过“Freq”选项卡对这些参数进行设置，如图 7-3 所示。相关参数描述及说明见表 7-1。

表 7-1 “Freq”相关参数设置

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Frequency	基波频率	必须设置至少一个基波频率
Order	最大谐波次数	频率中含有的最大谐波次数
Maximum mixing order	最大混频次数	混频后频率成分的最大次数
Status level	设置仿真状态窗口中显示信息的多少	0：表示显示很少的信息 1 和 2：表示显示正常的仿真信息 3 和 4：表示显示很多的信息

【Sweep】如果在进行谐波平衡法仿真时需要对某个参数进行扫描，用户可以通过“Sweep”选项卡进行相关设置，如图 7-4 所示，各参数的含义见表 7-2。

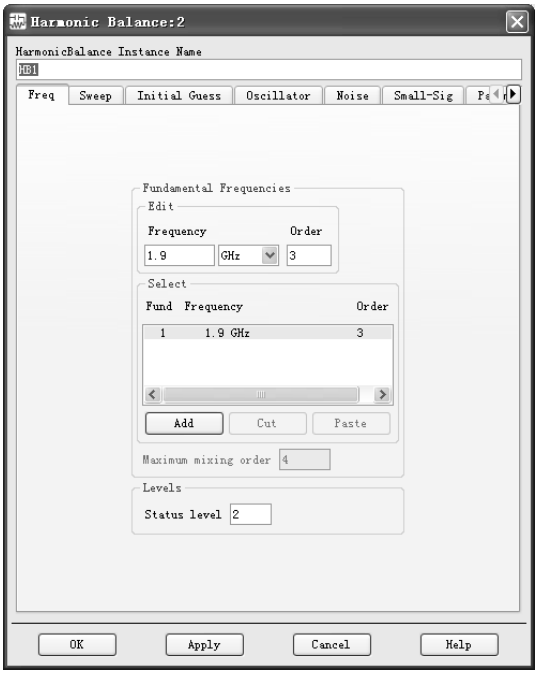


图 7-3 “Freq”参数设置

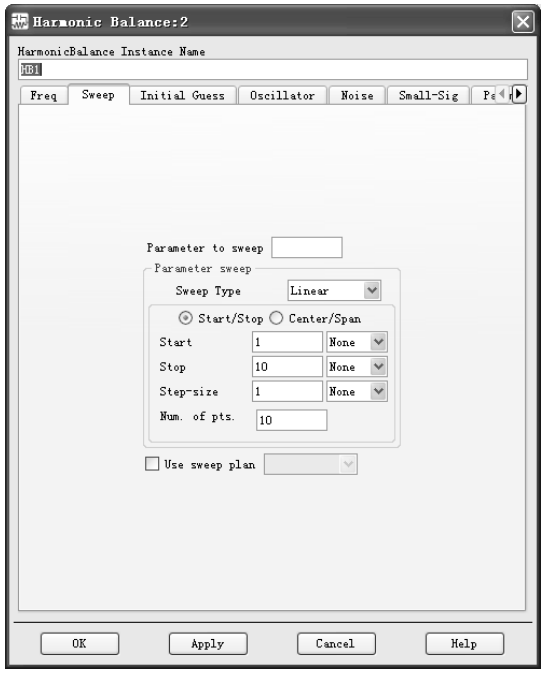


图 7-4 “Sweep”参数设置

表 7-2 “Sweep”相关参数设置

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Parameter to sweep	需要扫描的变量	必须是原理图中设置的变量
Sweep Type	扫描类型	Linear：线性扫描 Single Point：单点仿真 Log：对数扫描

续表

参数名称		参数描述	说　明
Start/Stop	Start	变量扫描参数的起始值	变量扫描范围设定为 Start/Stop
	Stop	变量扫描参数的终止值	
Center/Span	Center	变量扫描中心值	变量扫描范围设定为 Center/Span
	Span	变量扫描范围	
Step-size		变量扫描间隔	变量扫描类型设定为 Linear 有效
Num. of pts.		变量扫描点数	系统自动生成
Pts./decade		变量每增加 10 倍，扫描的点数	变量扫描类型设定为 Log 有效
Use sweep plan		是否使用扫描计划	若使用，则要添加“Sweep Plan”控件，并在控件中进行相应设置

【Oscillator】用户可以通过设置“Oscillator”选项卡的相关参数进行振荡器分析，如图 7-5 所示。在压控振荡器设计中重点介绍该选项卡的使用。

【Noise】用户可以利用“Noise”选项卡对噪声分析的相关参数进行设置，如图 7-6 所示。

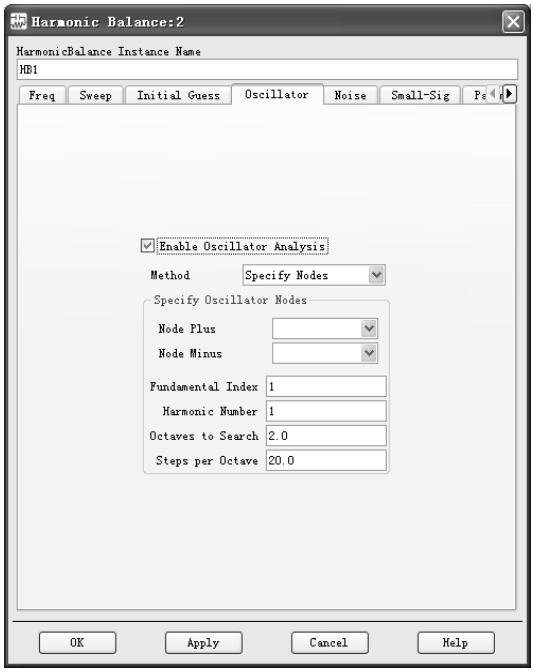


图 7-5　振荡器分析参数设置

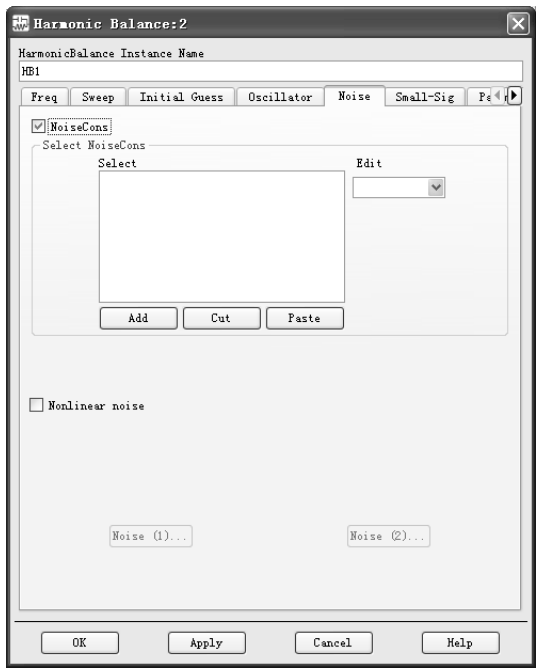


图 7-6　噪声分析参数设置

【Small-Sig】如果需要在谐波平衡法仿真中加入小信号分析，则可以通过“Small-Sig”选项卡进行相关设置，如图 7-7 所示。具体的参数含义与“Sweep”选项卡相同。

2．谐波平衡法仿真设置控制器

谐波平衡法仿真设置控制器（Options）如图 7-8 所示。它主要用来设置诸如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件特性等与仿真相关的参数。

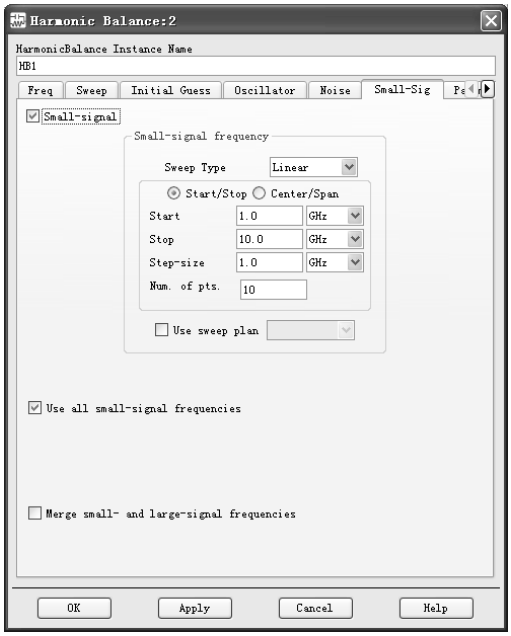


图 7-7　小信号分析参数设置

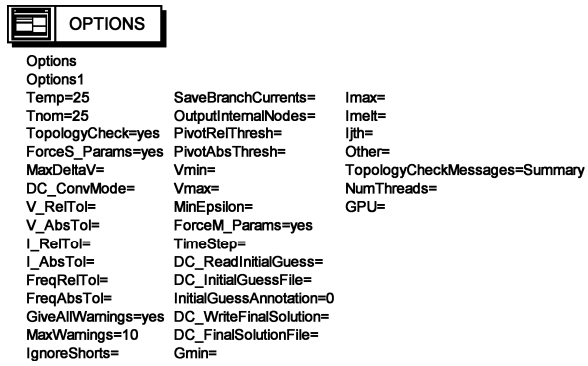


图 7-8　谐波平衡法仿真设置控制器

3．参数扫描计划控制器

参数扫描计划控制器（Sweep Plan）如图 7-9 所示。它主要用来控制仿真中的参数扫描计划。用户可以使用该控制器添加一个或多个扫描变量，并制订相应的扫描计划。

4．参数扫描控制器

参数扫描控制器（Prm Swp）如图 7-10 所示。它用来设置仿真中的扫描参数，该参数扫描可以在多个仿真实例中使用。

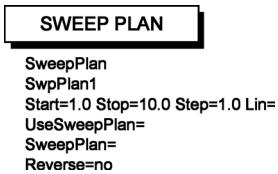


图 7-9　参数扫描计划控制器

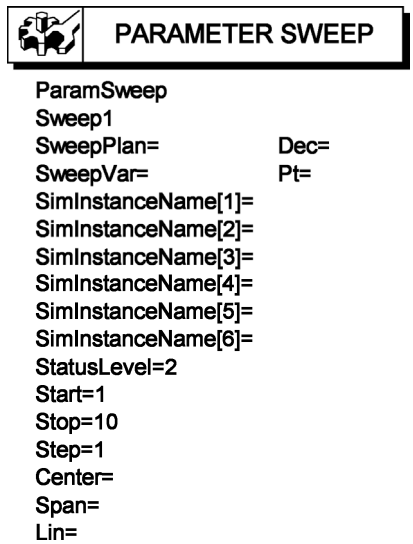


图 7-10　参数扫描控制器

5．终端负载

终端负载（Term）如图 7-11 所示，用来设置端口标号以及各端口终端负载阻抗。

6．线性化预算分析控件

线性化预算分析控件（BudLin）如图 7-12 所示，用来对电路进行线性化预算分析。

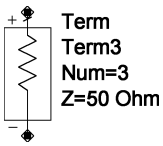


图 7-11　终端负载

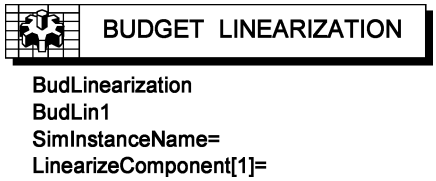


图 7-12　线性化预算分析控件

7．谐波噪声控制控件

谐波噪声控制控件（NoiseCon）如图 7-13 所示，用来设置电路谐波平衡法仿真过程中噪声的频率、噪声节点和相位噪声等相关参数。

8．接地振荡器端口元件

接地振荡器端口元件（OscPort）如图 7-14 所示，专门用来分析单端口振荡器。

9．差分振荡器端口元件

差分振荡器端口元件（OscPort2）如图 7-15 所示，用来分析振荡器元件差分结构的振荡器。

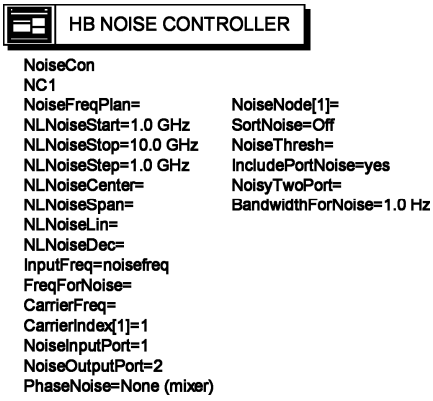


图 7-13　谐波噪声控制控件

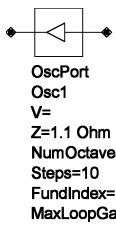


图 7-14　接地振荡器端口元件

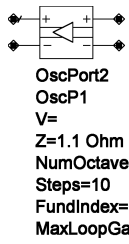


图 7-15　差分振荡器端口元件

10．其他控件

【节点设置控件与节点名控件】节点设置控件（NdSet）与节点名控件（NdSet Name）如图 7-16 和图 7-17 所示，用来设置仿真电路中的相关节点以及节点名称。

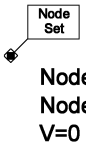


图 7-16　节点设置

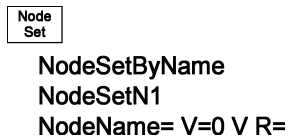


图 7-17　节点名

【显示模板控件和仿真测量等式控件】显示模板控件（Disp Temp）和仿真测量等式控件（Meas Eqn）如图 7-18 和图 7-19 所示，它们与前边介绍的控件工程相同，这里不详细介绍。



图 7-18　显示模板控件



图 7-19　仿真测量等式控件

【时域电流波形控件】时域电流波形控件（It）如图 7-20 所示，用户可以使用该控件计算电路时域电流，并可以在数据显示窗口中直接观察电流的波形。

【时域电压波形控件】时域电压波形控件（Vt）如图 7-21 所示，用户可以使用该控件计算电路时域电压，并可以在数据显示窗口中直接观察电压的波形。

【功率显示控件】功率显示控件（Pt）如图 7-22 所示，用来计算仿真电路中的端口功率。



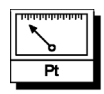
It
It1
It1=it(I_Probe1.i,0,10nsec,201)

图 7-20　时域电流波形控件



Vt
Vt1
Vt1=vt(vout,0,0,10nsec,201)

图 7-21　时域电压波形控件



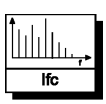
Pt
Pt1
Pt1=pt(vout,0,I_Probe1.i)

图 7-22　功率显示控件

【频域电流显示控件】频域电流显示控件（Ifc）如图 7-23 所示，用来计算仿真电路中的频域电流，并可以在数据窗口中直观地观察电流的频率成分。

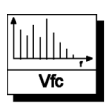
【频域电压显示控件】频域电压显示控件（Vfc）如图 7-24 所示，用来计算仿真电路中的频域电压，并可以在数据窗口中直观地观察电压的频率成分。

【功率谱密度显示控件】功率谱密度显示控件（Pspec）如图 7-25 所示，用来计算仿真电路中的功率谱密度，并可以在数据窗口中直观地观察信号的功率谱密度。



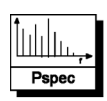
Ifc
Ifc1
Ifc1=ifc(I_Probe1.i,{1})

图 7-23　频域电流显示控件



Vfc
Vfc1
Vfc1=vfc(vout,0,{1})

图 7-24　频域电压显示控件



Pspec
Pspec1
Pspec1=pspec(vout,0,I_Probe1.i)

图 7-25　功率谱密度显示控件

【输入三阶交调点分析控件】输入三阶交调点分析控件（IP3in）如图 7-26 所示，用来分析电路的输入三阶交调分量。

【输出三阶交调点分析控件】输出三阶交调点分析控件（IP3out）如图 7-27 所示，用来分析电路的输出三阶交调点。



IP3in
IP3in1
IP3in1=ip3_in(vout,0,{1,0},{2,-1},50)

图 7-26　输入三阶交调点分析控件



IP3out
ipo1
ipo1=ip3_out(vout,{1,0},{2,-1},50)

图 7-27　输出三阶交调点分析控件

【*N* 阶截止点分析控件】*N* 阶截止点分析控件（IPn）如图 7-28 所示，用来分析电路的 *N* 阶截止点，其中 *N* 可以在参数设置中设置。

【信噪比分析控件】信噪比分析控件（SNR）如图 7-29 所示，用来分析电路中信号的信噪比。



IPn
IPn1
IPn1=ipn(Vplus,Vminus,current,{1,0},{2,-1},3)

图 7-28　*N* 阶截止点分析控件



SNR
SNR1
SNR1=snr(vout,vout.noise,{1})

图 7-29　信噪比分析控件

7.3　谐波平衡法仿真的一般步骤

（1）选择器件模型并建立电路原理图。

（2）确定需要进行谐波平衡法仿真的输入、输出端口，并进行标识。

（3）在“Simulation-HB”元件面板列表中选择谐波平衡法仿真控制器 HB，并放置在原理图设计窗口中。

（4）双击谐波平衡法仿真控制器，对仿真参数进行设置，设置内容包括基准频率、谐波次数和参数扫描相关参数等。

（5）如果扫描变量较多，则需要在“Simulation-HB”元件面板列表中选择“Prm Swp”控件，双击控件，在其中设置多个扫描变量，以及每个扫描变量的扫描类型和扫描参数范围等。

（6）设置完成后，执行仿真。

（7）在数据显示窗口查看仿真结果。

7.4　ADS 中谐波平衡法仿真例程

7.4.1　单音信号 HB 仿真

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，打开“Tutorial/SimModels_wrk.7zads”工程。

（3）在工程“Folder View”选项卡目录中选择设计 HB1，单击该文件夹，打开

schematic，如图 7-30 所示。

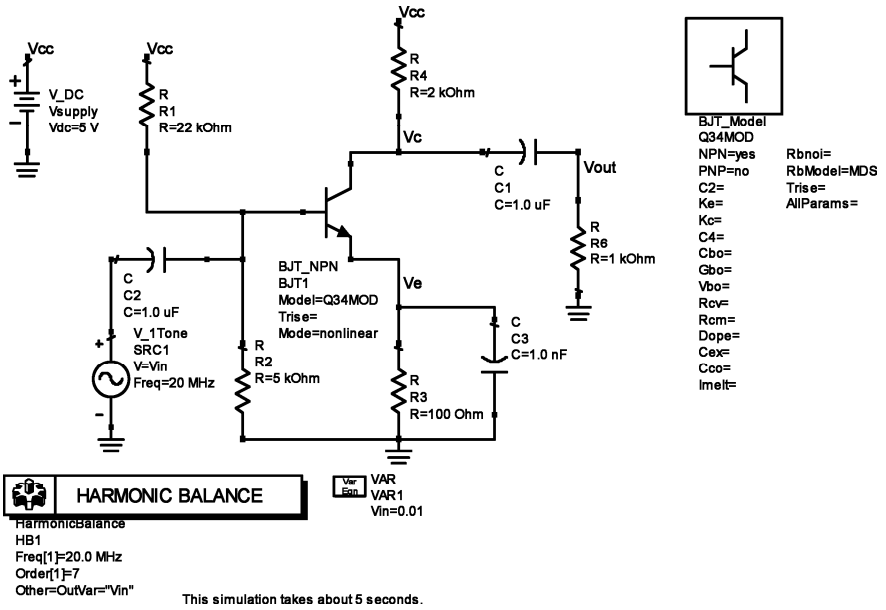


图 7-30　HB1 电路原理图

（4）单击仿真按钮进行仿真。仿真结束后在数据显示窗口显示仿真结果，如图 7-31 所示。

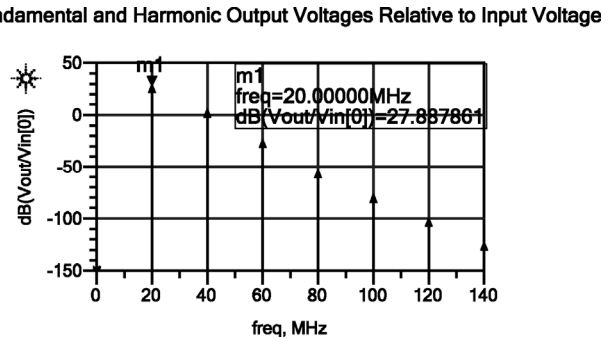


图 7-31　仿真结果

7.4.2　参数扫描

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，打开“Tutorial/SimModels_wrk.7zads”工程。

（3）在工程“Folder View”选项卡目录中选择设计 HB2，单击该文件夹，打开 schematic，如图 7-32 所示。

（4）频域功率源 P_1Tone 的参数设置如下：

☺ Num=1;

☺ P=dbmtow(-10)，式中 dbmtow()用于将功率单位转化为 dBm;

☺ Freq=freq_swp，这表示功率源的频率参数为一个变量，将在后面进行定义。

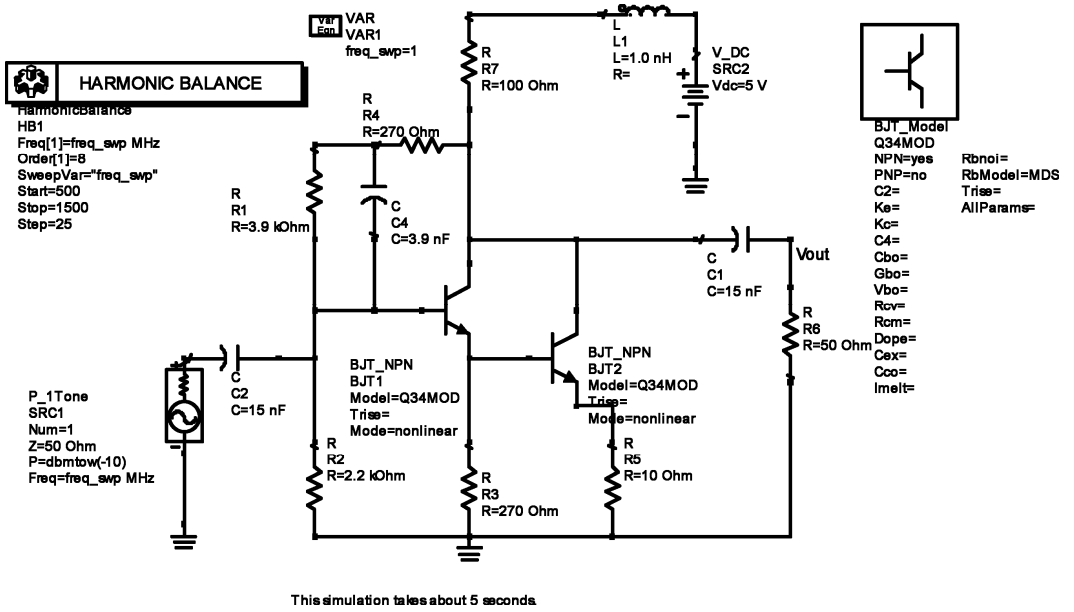


图 7-32　对谐波平衡仿真中的参数进行扫描

（5）谐波平衡仿真控制器 HB1 参数设置如下：

☺ Frequency=freq_swp MHz;

☺ Order=8;

☺ Parameter to sweep=freq_swp;

☺ Sweep Type=Linear;

☺ Start=500;

☺ Stop=1 500;

☺ Step=25。

（6）VAR 控件参数设置如下：

☺ 在【Variable or Equation Entry Mode】下拉菜单中选择 Name=Value 项；

☺ 在【Select Parameter】中添加一个变量，名称为 freq_swp，并设置它的默认值为 freq_swp=1。

（7）单击仿真按钮，进行仿真。仿真结束后在数据显示窗口显示仿真结果，如图 7-33 所示。

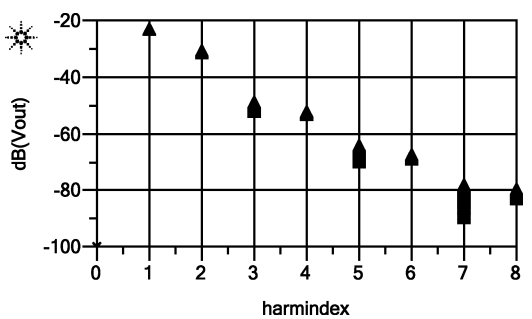


图 7-33　输出信号功率谱

（8）除了输出信号的功率谱外，读者还可以观察到在每个频率输出信号的功率曲线和随着基准频率的变化输出信号的各高次谐波频率的数据列表，分别如图 7-34 和图 7-35 所示。

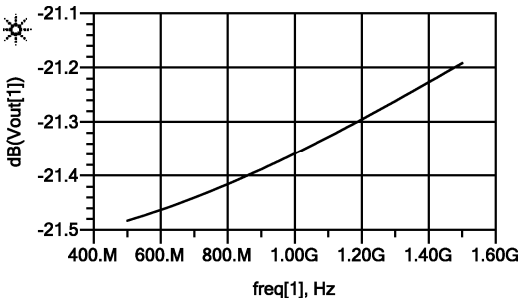


图 7-34　输出信号功率随频率变化曲线

harmindex	HB2..freq
freq_swp=500.000	
0	0.0000 Hz
1	500.0 MHz
2	1.000 GHz
3	1.500 GHz
4	2.000 GHz
5	2.500 GHz
6	3.000 GHz
7	3.500 GHz
8	4.000 GHz
freq_swp=525.000	
0	0.0000 Hz
1	525.0 MHz
2	1.050 GHz
3	1.575 GHz
4	2.100 GHz
5	2.625 GHz
6	3.150 GHz
7	3.675 GHz
8	4.200 GHz
freq_swp=550.000	
0	0.0000 Hz
1	550.0 MHz
2	1.100 GHz
3	1.650 GHz
4	2.200 GHz
5	2.750 GHz
6	3.300 GHz

图 7-35　输出信号谐波成分列表

7.5　谐波平衡法仿真实例

本节将继续以 1.9GHz 放大器的设计为基础，进一步讨论谐波平衡仿真的基本方法，在此基础上完成分析频谱、压缩输出功率、计算 TOI 和其他一些非线性参数的方法。

7.5.1　单音信号仿真

1．构建电路

（1）启动 ADS2012 软件，新建项目空间，命名为 chapter7_wrk。

（2）按照第 6 章的仿真原理图 s_final（见图 6-80）。用一个新名称 HB_basic 保存原理图，删除所有仿真测量组件及输入端口（Term）。

（3）在“Sources_Freq Domain”元件面板中，选择 P_1Tone 控件，插入输入端。

（4）在图中标注 Vin、Vout、VC 和 VB 四个节点。

（5）修改 P_1Tone 源参数，同时命名为 RF_source，如图 7-36 所示。

☺ Freq=1.9 GHz;

☺ Z=50 Ohm;

☺ P= dbmtow（-40）;

☺ Num=1。

2．设置仿真参数

（1）在“Simulation-HB”元件面板中，在原理图上放置谐波平衡仿真控制器，如图 7-37 所示。

（2）修改参数。

☺ Freq[l]=1.9GHz 基波频率为 1.9GHz;

☺ Order[1]=3 谐波次数为 3。

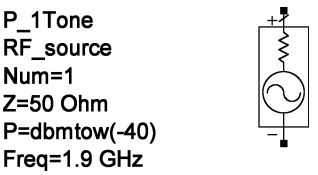


图 7-36　RF 源设置

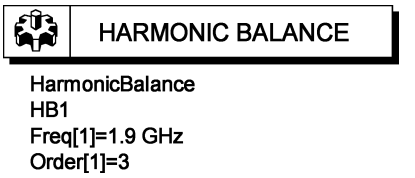


图 7-37　谐波平衡仿真控制器

3．设定测量方程式

（1）在“Simulation-HB”元件面板中，选择测量方程控件，放置到原理图中。

（2）双击测量方程控件，输入 dbm_out=dBm(Vout[1])方程，如图 7-38 所示。

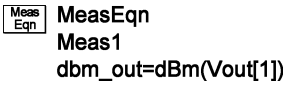


图 7-38　测量方程控件设置

> 方括号[1]中的数字指的是在分析中计算频率的索引值。当 Order=3 时，索引值表示为：index[0]是直流，index[l]是 1 900MHz，index[2]是二次谐波即 3 800MHz，index[3]是指三次谐波。因此，方程式表示以 dBm 表示的 1 900MHz 信号的输出功率。

（3）完整电路图如图 7-39 所示。

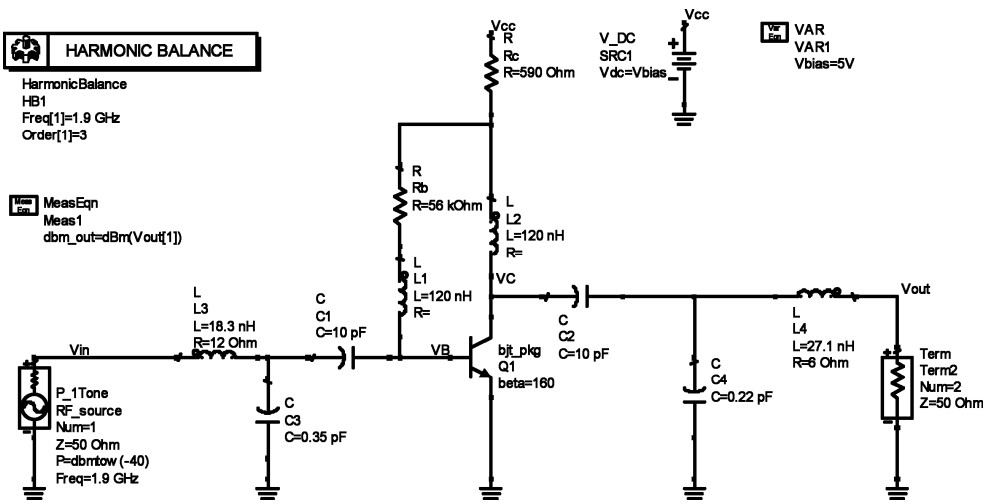


图 7-39　HB_basic 电路原理图

（4）进行仿真，没有任何警告和错误信息，仿真通过。

（5）改变谐波平衡控制器参数 Freq[1]=1800MHz。再次仿真，出现错误信息，如图 7-40 所示，原因是源频率（1 900MHz）与 HB1 频率（1 800MHz）相差 100MHz。故源频率与控制器频率一定要保持一致。

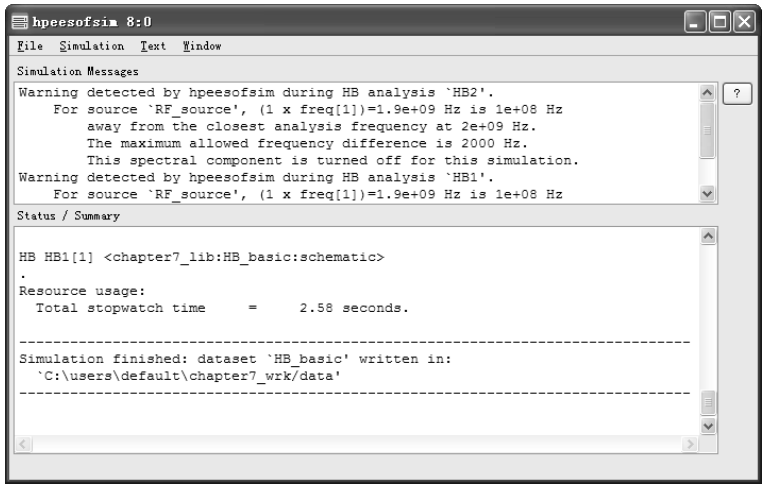


图 7-40　仿真警告信息

（6）重新设置谐波平衡控制器频率，Freq[1]=1 900MHz，并再次仿真。

4．仿真结果输出

（1）在数据显示窗口，插入 Vout 矩形图，得到输出信号的频谱。

（2）在基频上插入标记，如图 7-41 所示。放大器在 1.9GHz 频率点的输出功率为-4.876dBm。

（3）在数据显示窗口插入数据表，并使数据列表中显示“dbm_out”，可以得到输出信号的功率值，如图 7-42 所示。

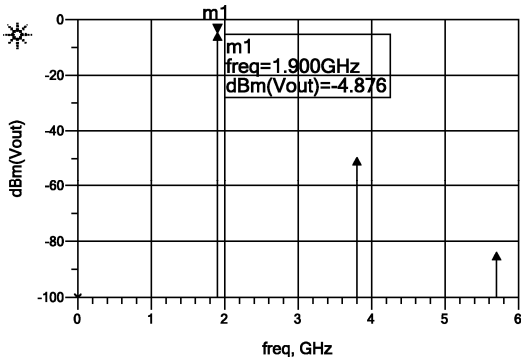


图 7-41　输出信号频谱图

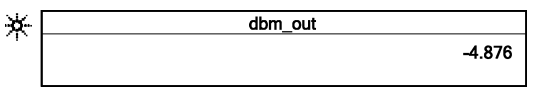


图 7-42　输出信号的功率值

（4）在数据显示窗口的左侧工具栏单击图标，插入 Vin 和 Vout 两个时域信号的数据轨迹。ts（时间序列）函数在谐波平衡法中将结果转换到时域。插入两个标记点，如图 7-43 所示，会发现 Vin 和 Vout 在同一个时刻输出信号相位基本一致（非反相）。

（5）在轨迹图中直接把 Vout 改为 VC，Vin 改为 VB 来编辑 *y* 轴标识，如图 7-44 所示。观察 m4 和 m5 点，信号相位相反。通过和图 7-43 对比，说明匹配网络对相位有着很大的影响。

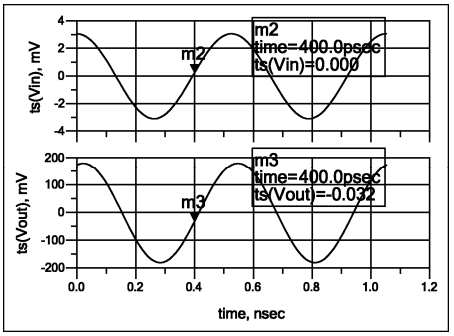


图 7-43　输入和输出信号的时域波形

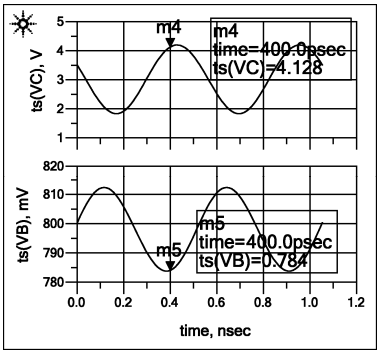


图 7-44　VB 和 VC 信号的时域波形

5．函数和索引的使用

（1）利用列表工具，显示 Mix 及 Vout 的值，如图 7-45 所示。在谐波仿真运行时数据组中就会产生一个 Mix 索引值。

freq	Mix	Vout
0.0000 Hz	0	0.000 / 0.000
1.900 GHz	1	0.180 / -14.199
3.800 GHz	2	0.001 / -170.939
5.700 GHz	3	1.963E-5 / 46.135

图 7-45　Mix 和 Vout 数据表

> 除非使用的是 dB、dBm 等单位，否则 Vout 是一个复数（幅度和角度）。

（2）通过双击列表，进入“Plot Traces & Attributes”对话框。添加新数据 Vin 到“Trace Options…”对话栏，鼠标左键双击 Vin 弹出新的对话框，在“Trace Expression”栏输入 dBm（Vin），如图 7-46 所示，然后单击 OK 按钮，得到如图 7-47 所示的更新数据表。

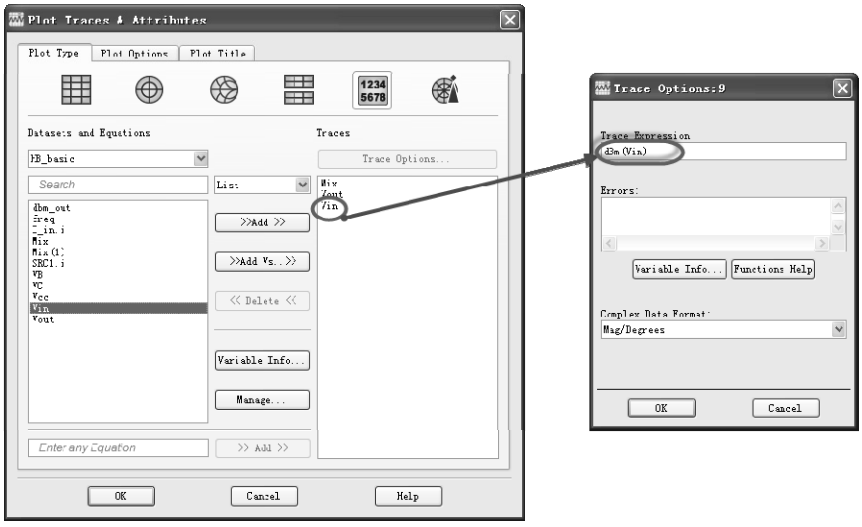


图 7-46　高级编辑对话框

freq	Mix	Vout	dBm(Vin)
0.0000 Hz	0	0.000 / 0.000	<invalid>
1.900 GHz	1	0.180 / -14.199	-40.214
3.800 GHz	2	0.001 / -170.939	-82.943
5.700 GHz	3	1.963E-5 / 46.1...	-111.162

图 7-47　更新数据表

（3）在 Vin 自变量中键入索引值[1]来编辑 dBm（Vin）数据，如图 7-48 所示。得到在索引频率为 1 时（1 900MHz）的 Vin 值为-40.214dBm。

freq	Mix	Vout	dBm(Vin[1])
0.0000 Hz	0	0.000 / 0.000	-40.214
1.900 GHz	1	0.180 / -14.199	
3.800 GHz	2	0.001 / -170.939	
5.700 GHz	3	1.963E-5 / 46.1...	

图 7-48　参数数据表（1）

（4）将光标插入 dBm（Vin[1]）表达式并键入逗号“,”和 50，显示效果如图 7-49 所示。dBm 函数中第二个自变量是 Zin，默认值为 50Ω，因此输出没有改变。

freq	Mix	Vout	dBm(Vin[1],50)
0.0000 Hz	0	0.000 / 0.000	-40.214
1.900 GHz	1	0.180 / -14.199	
3.800 GHz	2	0.001 / -170.939	
5.700 GHz	3	1.963E-5 / 46.1...	

图 7-49　参数数据表（2）

6．输入功率和 Zin

（1）在 HB_basic 设计中，从“Probe Components”元件控制面板中调出电流指示器控件（current probe），重命名为 I_in，插入到原理图中，如图 7-50 所示。

（2）重新仿真。仿真结束后，在数据显示窗口利用方程计算平均传输功率，如图 7-51 所示。

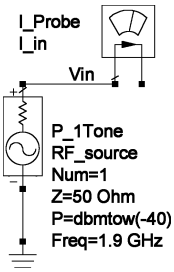


图 7-50　电流指示器

Eqn P_del_dbm=10*log(0.5*real(Vin[1]*conj(I_in.i[1])))+30

图 7-51　插入方程

0.5 表示峰值的平均值。conj 函数将复数电流转换为它的共轭形式。因为电压和电流在相位中有耗散功率，将功率转换为 dBm 后再加 30。

（3）如图 7-52 所示，写另一个方程计算 Zin。然后，将插入 Z_in 参数方程列表，如图 7-53 所示。注意到复数阻抗并不是 50Ω，而是 47.619Ω。

Eqn Z_in=Vin/I_in.i

图 7-52　输入阻抗方程

freq	Z_in
0.0000 Hz	<invalid>
1.900 GHz	47.619 / 0.686
3.800 GHz	50.000 / 180.000
5.700 GHz	50.000 / 180.000

图 7-53　输入阻抗值

（4）插入列表，显示 dBm(Vout[1])、dBm(Vin[1]，Z_in［1］)和 P_del_dbm 数据，如图 7-54 所示。

dBm(Vout[1])	dBm(Vin[1],Z_in[1])	P_del_dbm
-4.876	-40.003	-40.003

图 7-54　输入功率数据

7.5.2　压缩功率输出

放大器在理想状态下输出功率不变，实际的放大器当其功率增大到一定程度之后，输出曲线就不是线性变化，当放大器输出功率曲线和理想状态下放大器输出功率曲线相差 1dB 时，对应的输出功率就是 1dB 功率压缩点。

计算 1dB 功率压缩点有两种方法：

☺ 通过 XDB 仿真器计算。

☺ 扫描输入端的输入功率，也就是看输出信号随着输入端信号变化是怎么变化的。然后找到实际输出信号和理想输入信号相差 1dB 的点就是 1dB 功率压缩点。

1．用 XDB 仿真器进行压缩点测试

XDB 仿真控制器是谐波平衡仿真中专门用于增益压缩的仿真器。

（1）保存目前所有工作（包括原理图和数据显示窗口），以新名称 HB_1db 保存原理图，然后，关闭 HB_basic 数据显示。

（2）在新的原理图中，禁用 HB1 控制器，如图 7-55 所示。

（3）选择“Simulation_XDB”元件控制面板并在原理图中插入 XDB 仿真控制器，如图 7-56 所示。双击修改属性，Freq[1]和 GC 输入／输出频率都是 1.9GHz。参数 GC_XdB=1 表示测试的是 1dB 功率压缩点。如果想考察 3dB 或 6dB 压缩点，改变值就可以。

HARMONIC BALANCE
HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=1.9 GHz
Order[1]=3

图 7-55　禁用 HB 仿真控制器

GAIN COMPRESSION
XDB
HB2
Freq[1]=1.9 GHz
Order[1]=3
GC_XdB=1
GC_InputPort=1
GC_OutputPort=2
GC_InputFreq=1.9 GHz
GC_OutputFreq=1.9 GHz
GC_InputPowerTol=1e-3
GC_OutputPowerTol=1e-3
GC_MaxInputPower=100

图 7-56　XDB 仿真控制器

（4）在【Simulation】→【Simulation Setup】中，改变数据组名为 hb_xdb，然后仿真。

（5）当数据显示窗口打开后，利用列表显示 inpwr 和 outpwr，如图 7-57 所示。通过直接在数据后加入一个[1]来编辑列表，如图 7-58 所示。运行 1dB 增益压缩测试只用了几秒钟，这是因为放大器偏置非常高。1dB 压缩点大约在输入功率为-30.67dBm 处。

freq	inpwr	outpwr
0.0000 Hz	-30.67 dBm	3.499 dBm
1.900 GHz	-30.67 dBm	3.499 dBm
3.800 GHz	-30.67 dBm	3.499 dBm
5.700 GHz	-30.67 dBm	3.499 dBm

图 7-57　inpwr 和 outpwr 数据列表

inpwr[1]	outpwr[1]
-30.669	3.499

图 7-58　inpwr[1]和 outpwr[1]数据列表

📖 可以改变原理图和设置一个谐波平衡功率扫描，这是测试压缩点的另一个方法。

2．用功率扫描对压缩点测试

（1）禁用 XDB，激活 HB 控制器，如图 7-59 所示。

（2）插入 VAR 的变量方程控件，设置 RF_pwr= -40，如图 7-60 所示。

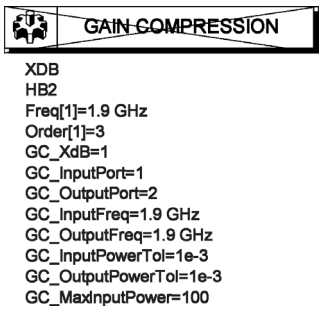


图 7-59　禁用增益压缩控制器

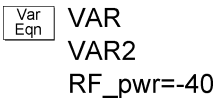


图 7-60　添加变量后的 VAR 控件

（3）设置 RF_source 源的功率为：P=polar(RF_pwr)，如图 7-61 所示。

（4）双击编辑谐波平衡（HB）控制器，如图 7-62 所示。

☺ SweepVar= “RF_pwr”;

☺ Start=-50;

☺ Stop=-20;

☺ Step=1;

☺ Order[1]=3。

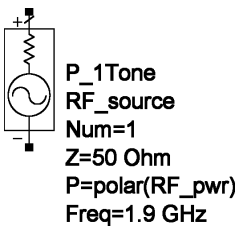


图 7-61　带变量的 P_1Tone 源

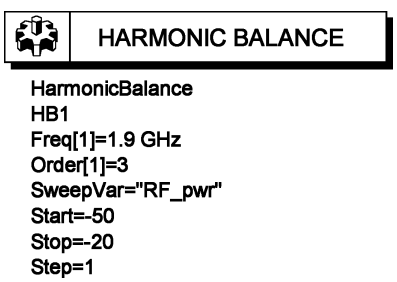


图 7-62　添加变量扫描后的 HB 仿真控制器

（5）单击菜单栏【Simulation】→【Simulation Setup】，弹出对话框，如图 7-63 所示。在“DataSet”对话框，改变“Data Display”数据组名为 HB_comp。单击 Simulate 按钮开始仿真。

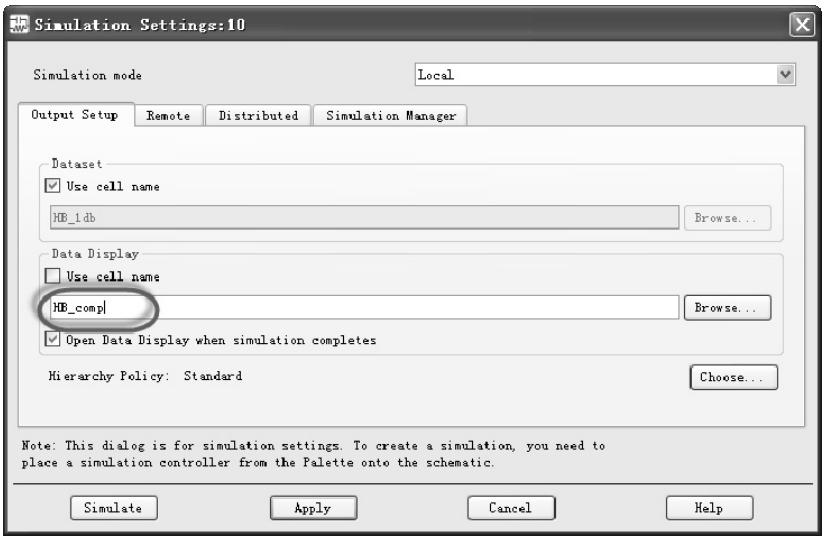


图 7-63　仿真设置对话框

（6）插入矩形图并选择 HB_comp 数据组，插入 dbm_out 数据。在曲线上插入标记。移动 m1 使 RF_pwr 值接近 XDB 仿真中 inpwr=-31dBm 的位置，如图 7-64 所示，此时，dbm_out=3.358，而 XDB 仿真中 outpwr=3.449dBm，两值很接近但不同，这说明两种方法得到的 1dB 功率压缩点不同。

> 图 7-64 中，RF_pwr=-31.000dBm，dbm_out=3.358 并不是该方法得到的 1dB 功率压缩点，仅是为了与 XDB 仿真结果进行对比。

（7）利用 dbm_out 数据设置建立 db_gain 方程，如图 7-65 所示。从 dbm_out 减去线性化的输入 RF_pwr，得到的结果是在所有 RF 频率范围内电路的增益。

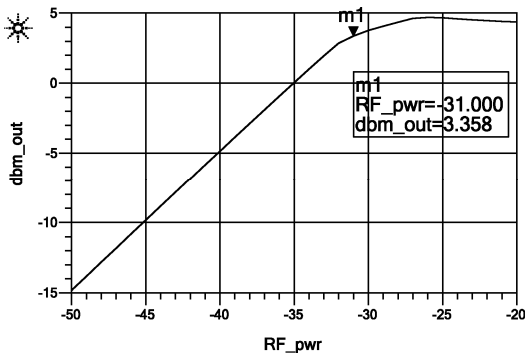


图 7-64　输出功率随输入功率变化曲线

Eqn db_gain=dbm_out-RF_pwr

图 7-65　计算增益等式

（8）在图 7-64 中添加 db_gain 曲线，如图 7-66 所示。从图中 m1 及 m2 对应的值来验证 db_gain 方程的正确性。

（9）利用 Eqn 控件设置另外一个方程，如图 7-67 所示，这代表没有压缩的理想输出功率，其中假设第一个 RF 频点[0]没有功率压缩。

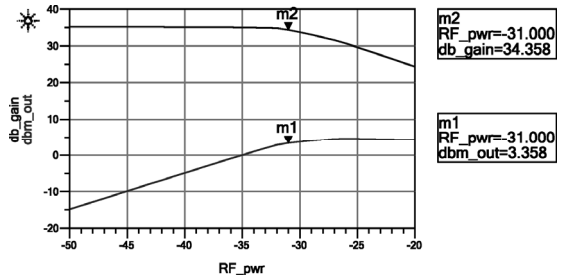


图 7-66　增益和输出功率随输入功率变化曲线

Eqn line=RF_pwr+db_gain[0]

图 7-67　理想状态下输出功率方程

（10）新建矩形图插入 dbm_out 及 line 曲线，如图 7-68 所示。明显可以看出放大器输出功率与线性输出功率的偏离。

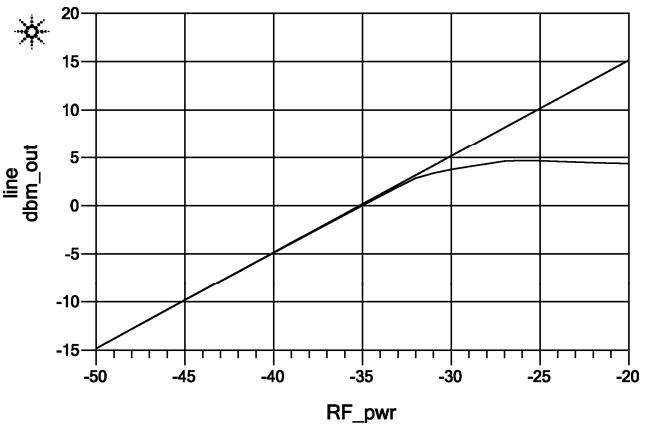


图 7-68　理想输出功率曲线与实际输出功率曲线对比

（11）插入一个新的矩形图，在“Equations”里选择 db_gain 变量并单击 >>Add Vs...>> 按钮，在弹出的对话框中选择“HB_comp”数据组，选择 dbm_out 变量，并单击 OK 按钮，如图 7-69 所示。

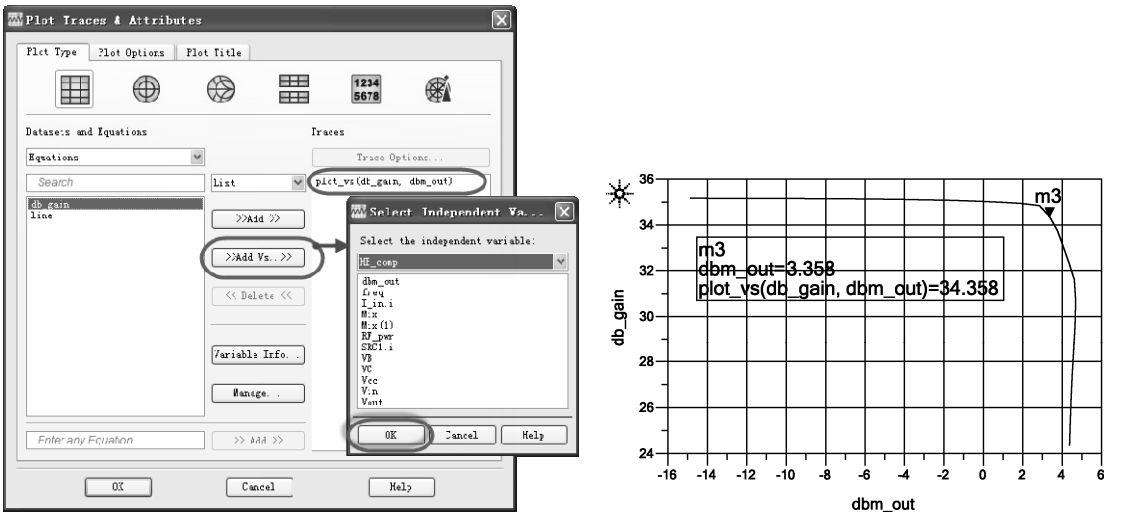


图 7-69　增益随输出信号变化图

曲线有明显下降点，m3 点为 1dB 功率压缩点。

7.5.3　双音谐波平衡仿真

在前面学习的基础上，用另外一个实例，进一步介绍多变量谐波平衡法仿真，这在复杂电路系统的设计及仿真中应用更为广泛。

（1）用一新名称 HB_2Tone 保存 HB_1db 原理图。

（2）修改 VAR 控件，加入 RF_freq 和 spacing 变量，初始值设置如图 7-70 所示。

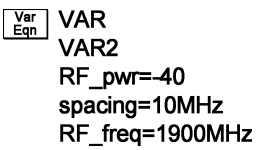


图 7-70　添加变量后的 VAR 控件

（3）改变源为 P_nTone，并对其参数进行设置使其具有双音 Freq[1]和 Freq[2]，如图 7-71 所示。

（4）修改谐波平衡控制器，加入另一个频率 Freq[2]及数值，同时修改 Freq[1]，如图 7-72 所示。从控件 HB1 中去掉 RF_pwr。

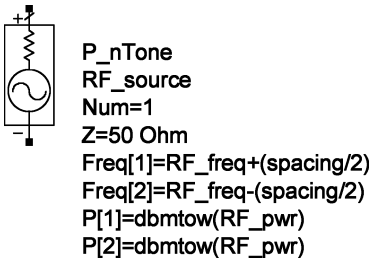


图 7-71　带变量的 P_nTone 源

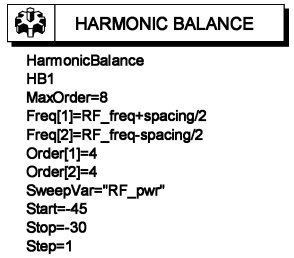


图 7-72　双音谐波平衡仿真 HB 仿真器控件设置

（5）整体原理图如图 7-73 所示。

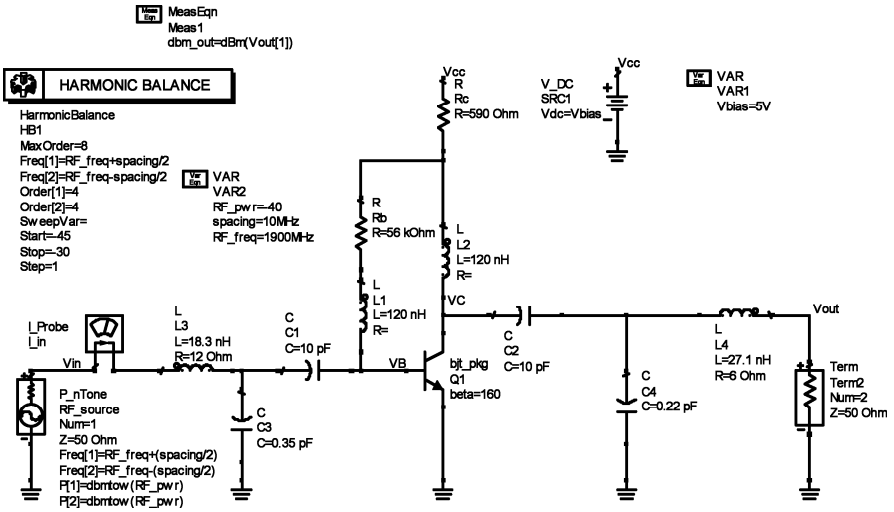


图 7-73　HB_2Tone 电路原理图

（6）单击仿真按钮，进行仿真。仿真结束后绘制 Vout 曲线，在 1.9GHz 附近添加标记，如图 7-74 所示。为了看到互调成分，可以将图放大，也可以改变 *x* 轴刻度，如图 7-75 所示。

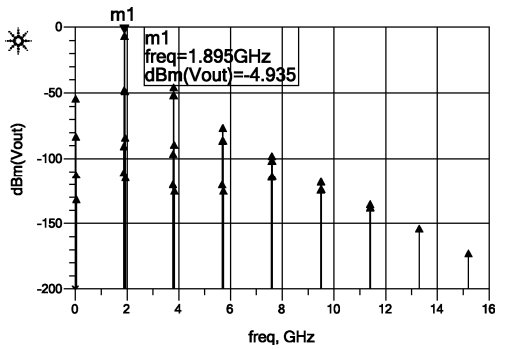


图 7-74　输出频谱图

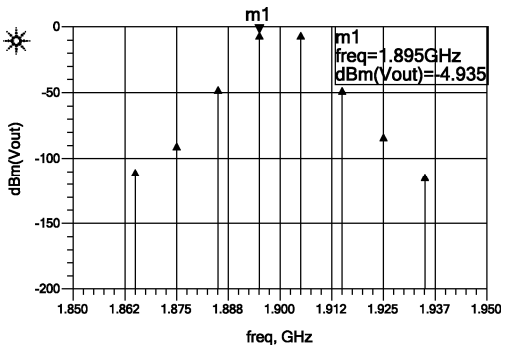


图 7-75　改变 *x* 轴后频谱图

（7）运用 Mix 索引值定制输出数据。添加如图 7-76 所示的数据表，ADS 利用 Mix 函数的两个索引值唯一确定所有频率。例如 max[{-1,2}]→1.885GHz，max[{0,4}]→7.580GHz。在数据显示窗口，建立如图 7-77 所示的方程，给 Tones 参数赋值插入 Vout 矩形图，在数据显示区左侧工作栏单击图标，插入 Vout 数据，以 dBm 显示，在“Traces”栏选中“Vout”。单击 Trace Options... 按钮，弹出新的对话框。在“Trace Type”选项卡显示类型选择“Spectral”；在“Trace Expression”选项卡中，在“Trace Expression”栏输入表达式 dBm (mix（Vout，Tones）)，单击 OK 按钮，如图 7-78 所示。由于 Tones 的设定，如图 7-78 所示显示了四个频率点，加入标记，可以观察相应频点的功率。

freq	Mix(1)	Mix(2)
0.0000 Hz	0	0
10.00 MHz	1	-1
20.00 MHz	2	-2
30.00 MHz	3	-3
40.00 MHz	4	-4
1.865 GHz	-3	4
1.875 GHz	-2	3
1.885 GHz	-1	2
1.895 GHz	0	1
1.905 GHz	1	0
1.915 GHz	2	-1
1.925 GHz	3	-2
1.935 GHz	4	-3
3.770 GHz	-2	4
3.780 GHz	-1	3
3.790 GHz	0	2
3.800 GHz	1	1
3.810 GHz	2	0
3.820 GHz	3	-1
3.830 GHz	4	-2
5.675 GHz	-1	4
5.685 GHz	0	3
5.695 GHz	1	2
5.705 GHz	2	1
5.715 GHz	3	0
5.725 GHz	4	-1
7.580 GHz	0	4
7.590 GHz	1	3
7.600 GHz	2	2
7.610 GHz	3	1

图 7-76　通过 Mix 的数据表观察制定频率

Eqn Tones=[{-1,2},{0,1},{1,0},{2,-1}]

图 7-77　理想频率矩阵方程

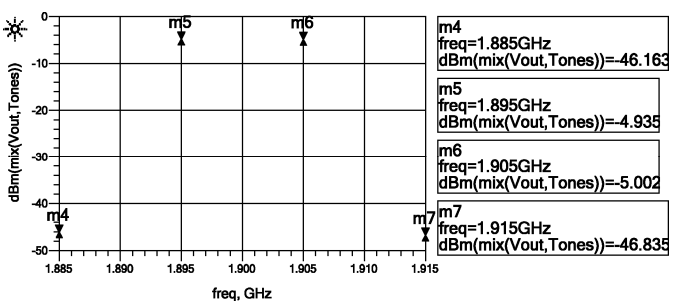


图 7-78　理想频谱的频谱图

7.5.4　三阶交调点的仿真

在射频或微波多载波通信系统中，三阶交调截取点 IP3（Third-order Intercept Point）是一个衡量线性度或失真的重要指标。交调失真对模拟微波通信来说，会产生邻近信道的串扰，对数字微波通信来说，会降低系统的频谱利用率，并使误码率恶化。因此，容量越大的系统，要求 IP3 越高，IP3 越高表示线性度越好及失真越小。IP3 通常输入两个音频测试，这里所指的音频与在低频电子线路的音频有区别，实际上是两个靠得比较近的射频或微波频率。

1．利用 IP3out 控件计算 TOI

（1）在 HB_2Tone 原理图上，插入两个 IP3out 控件，命名为 ipo_upper 及 ipo_lower，分别计算上边频和下边频三阶交调系数，如图 7-79 所示。

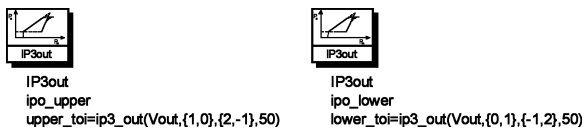


图 7-79　上边频及下边频 IP3out

（2）检查方程的正确性，然后仿真。

（3）在数据显示区左侧工作栏单击图标，列出 lower_toi 及 upper_toi 的值，单击“Plot Options”选项卡，不选中“Display Indep. Data”选项，如图 7-80 所示。单击 OK 按钮，列出 lower_toi 及 upper_toi 的值，如图 7-81 所示。从数据中可以看出，放大器三阶交调点的值比较合理而且几乎对称。

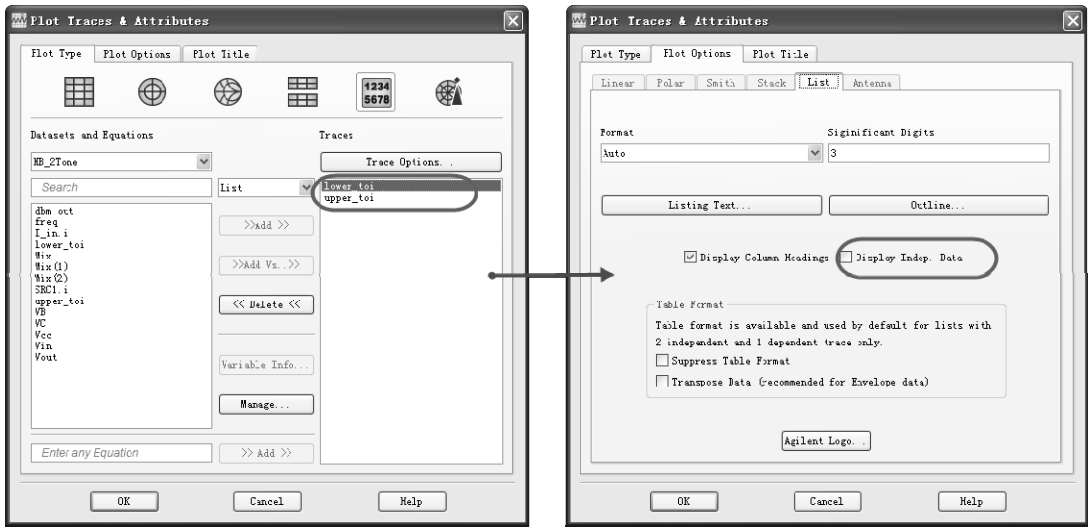


图 7-80　显示选项设置

lower_toi	upper_toi
15.679	15.914

图 7-81　lower_toi 和 upper_toi 的值

（4）在数据显示窗口，插入另外一个方程，如图 7-82 所示，计算三阶交调系数，并显示该数据，如图 7-83 所示。

Eqn my_toi=ip3_out(Vout,{1,0},{2,-1},50)

图 7-82　my_toi 方程

my_toi
15.914

图 7-83　my_toi 数据表

> 因为运用了同一函数 ip3_out，所以得到的值是相同的。唯一不同的是，my_toi 数据是仿真后得到的。

2．用 RF 功率扫描精确计算 TOI

（1）以 HB_toi 为名另存设计 HB_2Tone，设置谐波平衡仿真控件进行 RF 功率扫描，如图 7-84 所示。扫描变量为 RF_pwr，范围为-45～-30dBm。前边的设计已经测到 1dB 压缩点的 RF 输入功率约为-3ldBm，TOI 值约为 15dBm。

（2）仿真，利用数据显示窗口输出数据。

（3）编辑 my_toi 数据表，使其包括独立数据（RF_pwr），如图 7-85 所示。随着 RF_pwr 的增大，TOI 变化逐渐变大，它并不是线性变化。

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
HB1
MaxOrder=8
Freq[1]=RF_freq+spacing/2
Freq[2]=RF_freq-spacing/2
Order[1]=4
Order[2]=4
SweepVar="RF_pwr"
Start=-45
Stop=-30
Step=1

图 7-84　完成参数扫描设置的 HB 仿真控制器

RF_pwr	my_toi
-45.000	16.110
-44.000	16.086
-43.000	16.057
-42.000	16.019
-41.000	15.972
-40.000	15.914
-39.000	15.841
-38.000	13.852
-37.000	9.824
-36.000	7.796
-35.000	6.637
-34.000	5.929
-33.000	5.305
-32.000	4.888
-31.000	4.741
-30.000	4.459

图 7-85　RF_pwr 和 my_toi 数据表

（4）插入矩形图，绘制 my_toi 和 Vout 曲线，并修改 Vout 参数为 dBm（mix（Vout，{1，0}））, 如图 7-86 所示。

（5）在图 7-86 所示的矩形图中，再增加一条 Vout 曲线，再次修改 Vout 参数为 dBm(mix(Vout，{2，-1}))，如图 7-87 所示。

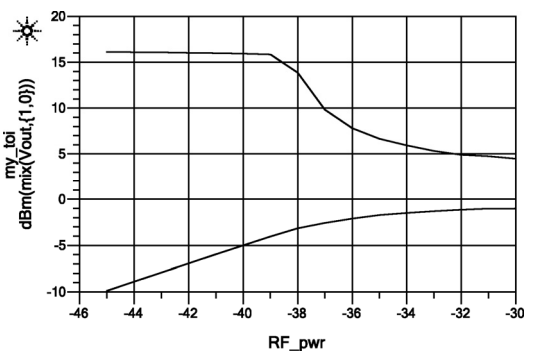


图 7-86　Vout 和 my_toi 曲线

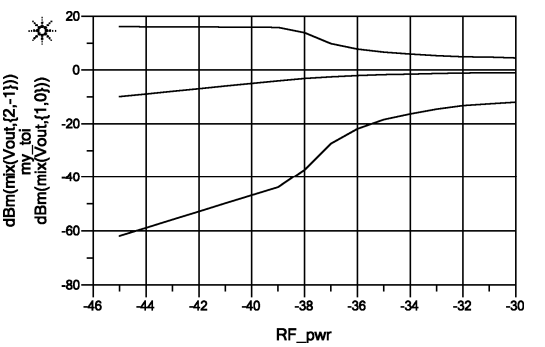


图 7-87　两个 Vout 和 my_toi 曲线

> 其中{2，−1}表示上变频 3 阶频率分量（1.915GHz），{1，0}表示上变频 2 阶频率分量（1.905GHz）。

（6）双击 my_toi 轨迹，并选择“Plot Axes”选项卡，在“Y axis”栏选择“Right Y Axis”，如图 7-88 所示。

（7）在图 7-88 的右 *Y* 轴是 TOI 值。同时，用来计算 TOI 的双频在左边。双击曲线，在“Plot Options”选项卡选择 Y Axis 同时不选“Auto scale”选项。然后增加 Max 到 10 并单击 OK 按钮。最后，放置一个标记在一个点上，这个点对于双音的斜率不再是 3∶1，如图 7-89 所示。

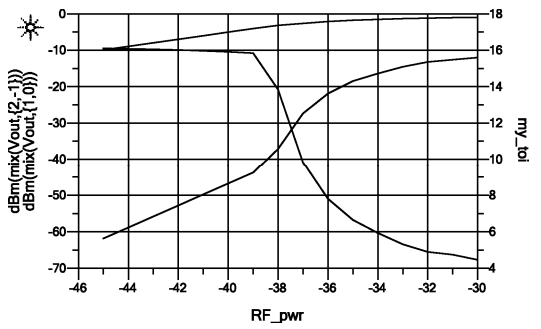


图 7-88　对 my_toi 曲线编辑后的曲线

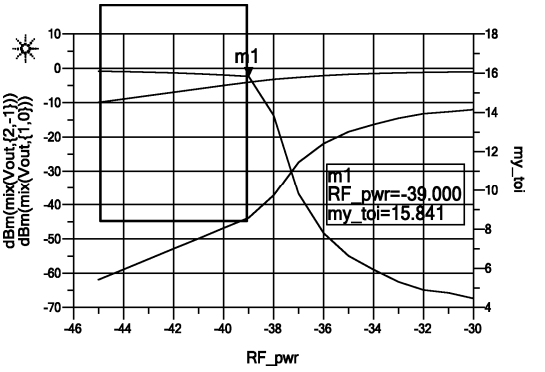


图 7-89　添加标记的 my_toi 曲线

从图中可以看出，IP3 在正确区域计算。但是，标记以后的曲线，3 阶产物开始一个急速上升。

7.6　思考题

（1）试写一个方程，使所有 5 阶交调频谱分量都能出现在频谱图上。

（2）用 pspec 函数计算负载的功率增益，并利用电流指示器设计电路验证该函数计算的正确性。

第 8 章　电路包络仿真

电路包络仿真技术结合了时域和频域方法的优点，克服了谐波平衡法仿真和 SPICE 仿真器的限制。对当前通信电路和子系统中复杂的调制信号进行有效的、精确的分析，本章将系统地介绍 ADS 中的电路包络仿真功能，并结合实例描述电路包络仿真的一般步骤及注意事项。



8.1　电路包络仿真基本原理及功能

电路包络仿真是目前在数字、高频和微波系统上进行数模混合仿真最有效率的工具之一。电路包络仿真将谐波平衡法和时域仿真技术结合在一起。类似谐波平衡法，电路包络仿真描述了电路的非线性行为和信号包含的谐波成分。同时，电路包络仿真在时域中得到扩展，它不被局限在仅描述稳态行为。电路包络仿真有效地描述了谐波平衡结果的时间变化级数。

在电路包络仿真中，输入波形被描绘成带有调制包络的 RF 载波，调制包络用时域状态表示。输入波形由载波项和时间变化项组成，时间变化项描述了对载波的调制。

幅度、相位和频率调制或这些调制的联合运用不再要求信号被描绘成正弦曲线的总和或是稳态。这使得在实际中描绘数字调制（伪随机）输入波形成为可能。

在电路包络仿真中，步长大小和仿真的总时程影响仿真的时间及需要的空间。这两个参数都关系到仿真中点的个数。时间步长也能影响精度，如果时间步长太大则不能对波形精确取样。在一些电路包络仿真中，全部的时间间隔必须包括一个或几个完整的波周期以避免傅里叶分析中的数学误差。

电路包络法同 SPICE 法相比的一个优点是时间步长由调制带宽决定。在电路包络仿真中，带宽相对较窄，一般只有几兆赫兹，因此可以采用相对较大的时间步长而不会增加取样误差。

在 SPICE 中，时间步长依赖于 RF 载波频率或它的谐波频率，有些频率非常高。因此，为了达到相对应的精度，必须采用更大的时间步长，这就增加了计算时间和存储容量的要求。在电路包络仿真中，输入信号按照时域中载波的调制被定义。时间步长和仿真中总的时间间隔也被定义。当仿真运行时，输出端和其他希望节点的频谱在每个时间点被计算出来。这使得任意频谱分量的幅度和相位都可得到，频谱分量是关于时间的函数。

电路包络仿真多用在涉及调制解调以及混合调制信号的电路和系统中。例如，在通信系统仿真中，它可以用在带有 CDMA、GSM、QPSK 和 QAM 等调制信号的通信系统中；在雷达系统仿真中，它可以对 LFM 波、非线性调频波、脉冲编码等系统进行分析和仿真。从射频电路设计的角度来讲，对于随时间变化的电路，如 PLL、AGC、调制器和 VCO 等，电路包络仿真极为有用。

8.2　电路包络仿真面板与仿真控制器

ADS 中有针对电路包络仿真的元件面板，在“Simulation-Envelope”面板中包括了所有电路包络仿真需要的控件，如图 8-1 所示。

常用的控件名称如下。

ENV：电路包络仿真控制器

Options：电路包络仿真设置控制器

Sweep Plan：参数扫描计划控制器

Prm Swp：参数扫描控制器

NdSet：节点设置控件

NdSet Name：节点名控件

Disp Temp：显示模板控件

Meas Eqn：仿真测量等式控件



图 8-1　电路包络仿真面板

电路包络仿真控制器（ENV）如图 8-2 所示，是控制电路包络仿真最主要的控件，用来设置电路包络仿真的基本参数。

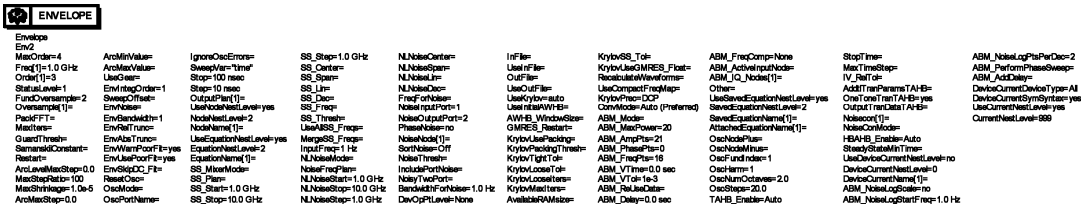


图 8-2　电路包络仿真控制器

双击电路包络仿真控制器，可以看到其参数修改界面，如图 8-3 所示，其中包括“Env Setup”、“Env Params”、“Initial Guess”、“Oscillator”、“Fast Cosim”、“Params”、“Solver”、“Noise”、“Small-Sig”、“Output”、“Display”等 11 个选项卡一些重要的参数设置，下面主要介绍常用参数。

【Env Setup】电路包络仿真是一种频域综合的仿真方法，对仿真执行的起始时间点、终止时间点、基准频率和高次谐波等时频参数进行设置。用户可以进行“Env Setup”设置，如图 8-3 所示。其参数含义见表 8-1。

表 8-1　包络仿真控制器设置中的相关参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Stop time	仿真执行的终止时间	起始时间为 0
Time step	仿真执行的时间间隔	设定包络信号的带宽，对于一个特定的时间间隔 T，系统允许的最大带宽为$\pm 0.5/T$
Frequency	基波频率	基波频率值
Order	最大谐波次数	
Maximum mixing order	最大混频次数	

续表

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Status level	仿真状态窗口中显示信息的多少	0：显示很少的仿真信息 1 和 2：显示正常的仿真信息 3 和 4：显示较多的仿真信息

【**Env Params**】仿真执行的算法、扫描偏移量、系统噪声和带宽等相关参数可以通过选择“Env Params”选项卡进行设置，如图 8-4 所示。其参数含义见表 8-2。



图 8-3　包络仿真时间频率设置界面



图 8-4　包络仿真相关参数设置

表 8-2　包络参数设置中的相关参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Integration	仿真执行采用的综合算法	Backward Euler 表示仿真中采用 Backward Euler 综合算法 Trapezoidal 表示仿真中采用 Trapezoidal 综合算法 Gear’s 表示仿真中采用 Gear’s 综合算法
Sweep offset	扫描偏移量	设置仿真执行的时间偏移，例如，Stop time 设置为 1ms，Sweep offset 设置为 0.6ms，则在仿真结果中将显示 0～0.4ms 的数据
Turn on all noise	包络噪声设置	选定此项将打开所有的噪声
Bandwidth fraction	包络带宽	设定在仿真执行时间内的包络信号带宽
Relative tolerance	相对公差	设置仿真相对公差
Absolute tolerance	绝对公差	设置仿真绝对公差

【**Fast Cosim**】协仿真参数一般在电路包络仿真与 Ptolemy 仿真共同执行协仿真时设置，其界面如图 8-5 所示。用户可以通过选择“Fast Cosim”选项卡进行协仿真参数设置，相关参数及其含义见表 8-3。

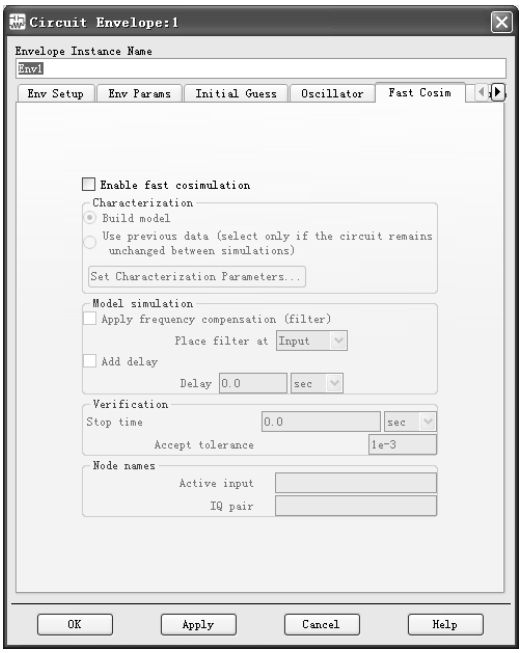


图 8-5　快速协仿真参数设置界面

表 8-3　快速协仿真参数设置中的相关参数

参 数 名 称	参 数 描 述	说　　明
Enable fast cosimulation	允许执行快速协仿真	选中此项将在仿真中对某个子电路进行协仿真，如果子电路不适合被协仿真，系统将出现警告信息
Max Input Power	最大输入功率	定义在执行协仿真的子电路的最大输入功率
Number of amplitude. pts.	幅度值点数	设置从 0 到最大输入功率确定的幅度之间的点数
Number of phase pts.	相位值点数	设置每个幅度值点的相位参数
Number of frequency pts.	频率值点数	设置执行协仿真的子电路中的小信号的频率点数
Apply frequency Compensation（filter）	频率补偿	设置在协仿真中是否进行频率补偿
Add delay	延时	设置协仿真子电路中的传输延时
Active Input	有效输入	当子电路中存在多个输入时，仅有一个可以设置为有效输入，或者将两个输入设置为 IQ 输入对
IQ Pair	设置 IQ 对	当子电路的输入或输出为一个 IQ 对时，在这个参数中进行设置

除了前面讲到的参数外，在电路包络仿真控制器中还可以设置包括仿真结果的输出参数、显示参数、初始推测和仿真执行所用的数学方法等相关内容，一般在仿真中不经常使用，默认即可，这里不再赘述。

8.3　电路包络仿真基本过程

（1）选择器件模型并建立电路原理图。

（2）在“Simulation-Envelope”元件面板列表中选择电路包络仿真控制器 ENV，并放置在原理图设计窗口中。

（3）双击电路包络仿真控制器，对仿真参数进行设置，设置内容包括仿真起止时间、时间间隔、基准频率、谐波次数和参数扫描等相关参数。

（4）如果扫描变量较多，则需要在“Simulation-Envelope”元件面板列表中选择“Prm Swp”控件，双击控件，在其中设置多个扫描变量，以及每个扫描变量的扫描类型、扫描参数范围等。

（5）设置完成后，执行仿真。

（6）在数据显示窗口查看仿真结果。

8.4 ADS 中电路包络仿真例程

ADS 中自带电路包络仿真例程，通过该例程可以使读者初步了解电路包络仿真的基本过程。

1．原理图构建

（1）运行 ADS2012，进入软件主窗口。

（2）在 ADS2012 主窗口单击工具栏按钮，查看系统自带的工程，打开“RFIC/Mixers_wrk.7zap”工程。

（3）在工程的原理图目录中选择设计 IMDRFSwpEnv 文件夹并双击，打开 schematic 原理图，如图 8-6 所示。

2．查看仿真参数

（1）双击电路原理图中的电路包络仿真控制器 ENVELOPE，完成参数设置，如图 8-7 所示。

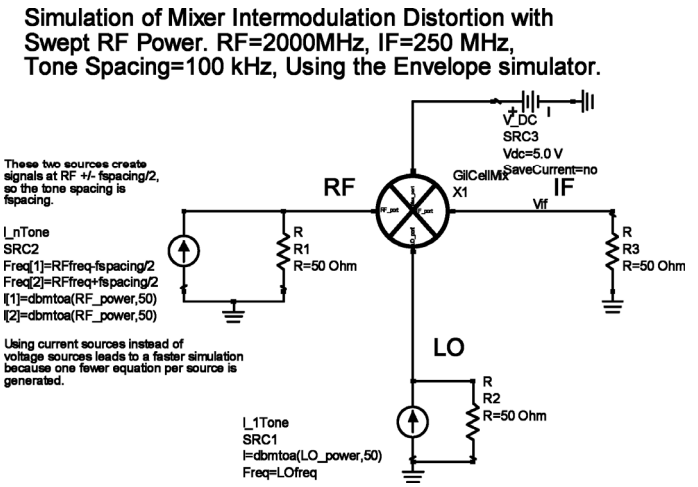


图 8-6 电路原理图

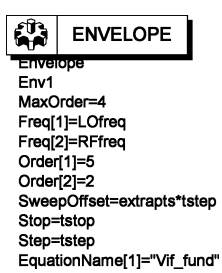


图 8-7 电路包络仿真控制器设置

☺ MaxOrder=4 最大交调频率的阶数为 4;

☺ Freq[1]=Lofreq，Freq[2]=RFfreq 两个基波频率，分别为本振频率和射频频率；

☺ Order[1]=5，Order[2]=2 两个基波频率的阶数分别为 5 和 2；

☺ SweepOffset=extrapts*tstep 扫描偏移量为 extrapts*tstep；

☺ Stop=tstop，Step=tstep 终止时间和时间间隔分别为 tstop 和 tstep；

☺ EquationName[1]=“Vif_fund”公式名称为 Vif_fund。

（2）双击电路原理图中的参数扫描控制器 PARAMETER SWEEP，完成参数设置，如图 8-8 所示。

☺ SweepVar=“RF_power”扫描变量为 RF_power；

☺ SimInstanceName[1]=“Env1”扫描的仿真实例为当前仿真 Env1；

☺ Start=−50，Stop=−20，Step=10 扫描的起始值、终止值和间隔分别为−50、−20 和 10。

（3）双击电路原理图中的变量控件 VAR，完成参数设置，如图 8-9 所示。

☺ RF_power=−20　RF_power 为变量，且变量初始值为−20；

☺ RFfreq=2 GHz　RFfreq 为变量，且变量初始值为 2GHz；

☺ fspacing=100 kHz　fspacing 为变量，且变量初始值为 100kHz；

☺ extrapts=3　extrapts 为变量，且变量初始值为 3；

☺ numpts=20　numpts 为变量，且变量初始值为 20；

☺ LO_power=−5　LO_power 为变量，且变量初始值为−5；

☺ tstop=（numpts+extrapts）*tstep　tstop 为变量，且变量初始值由公式决定；

☺ tstep=1/((fspacing/2)*numpts)　tstep 为变量，且变量初始值由公式决定。

（4）双击测量方程控件 MeasEqn，如图 8-10 所示，其方程为：Vif_fund=[mix(Vif,{−1,1})]。



图 8-8　参数扫描控制器设置

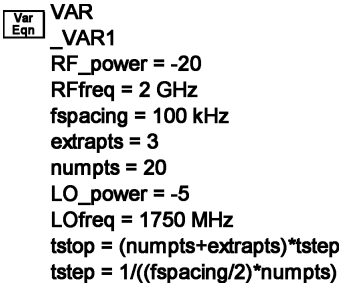


图 8-9　变量控件的设置

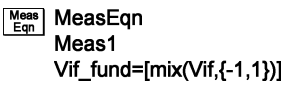


图 8-10　测量方程控件的设置

3．执行仿真

（1）单击工具栏中的按钮，等待仿真结束。

（2）仿真结束后，系统弹出数据显示窗口，如图 8-11 所示。可以观察到中频（IF）频谱。

（3）除了中频频谱外，数据显示窗口中还给出了 TOI 计算方程和数据列表，如图 8-12 所示。

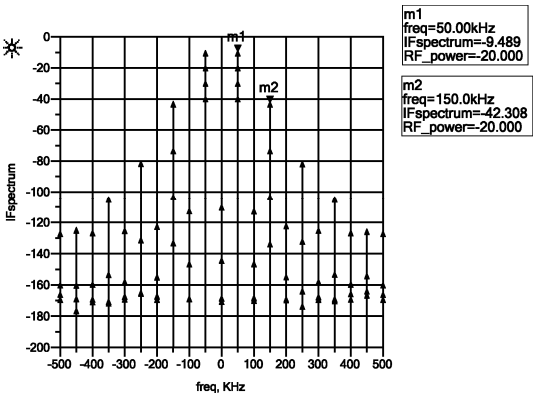


图 8-11　仿真结果中的中频频谱

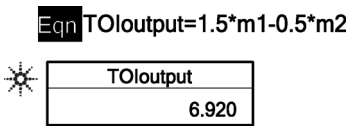


图 8-12　TOI 计算方程和数据列表

8.5　电路包络仿真实例

在 8.4 节电路包络仿真的基础上，进一步分析输入信号为脉冲或诸如 GSM、CDMA 调制信号等电路的包络仿真，使读者对电路包络仿真有更深刻的认识，对输出信号进行时域和频域分析。

8.5.1　运算放大器包络仿真

运算放大器包络仿真主要包括包络仿真器的设置、试验仿真参数和失真测试等内容。

1．创建原理图

（1）新建项目空间，命名为 chapter8_wrk，其他选项默认。

（2）新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ckt_env_basic。

（3）在“Sources-Modulated”元件面板上，插入 PtRF_Pulse 源，在“system-Amp & Mixers”元件面板插入 Amplifier2 控件，并按照图 8-13 所示创建电路选择。

（4）双击 Amplifier2 控件，修改属性：

☺ S21=dbpolar(10,0)　S21=10dB，相位为 0°（dB 和相位用逗号分开）；

☺ S11=dbpolar(−50,0)，S22=dbpolar(−50,0)　S11 和 S22 是−50dB（回波损失或失配衰减）和 0°相位；

☺ 确保对 S21、S11 和 S22 使用 dbpolar 函数；

☺ S12=0　S12 也被设置为 0，表明没有反向泄漏（reverse leakage）。

> 📖 dbpolar 函数是一个把幅度以 dB 和极化角以度表示的复数转换成用实部和虚部表示复数的函数。

（5）双击 PtRF_Pulse 源，设置其属性：

☺ OffRatio=0　超比率为 0；

☺ Delay=0nsec　时延为 0ns；

☺ P=dbmtow(0)；

☺ Rise time=5ns 上升时间 5ns;

☺ Fall time=10ns　下降时间 10ns;

☺ Pulse Width=30ns 脉冲宽度 30ns;

☺ Period=100ns　周期 100ns。

（6）创建节点 Vout。

2．设置包络仿真控制器

（1）插入控制器设置 Freq[1]=1.0GHz，Order[1]=l。

（2）设置 Stop=50 nsec。这个时间要满足整个脉冲宽度，包括上升、下降时间和延迟。

（3）设置 Step=l nsec。这表明信号每 1ns 进行一次抽样，所以总共有 51 个数据采样点，如图 8-14 所示。

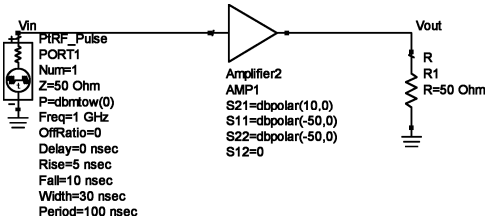


图 8-13　放大器电路包络仿真电路图

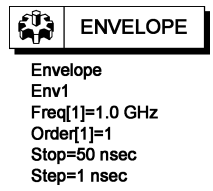


图 8-14　包络仿真器

3．频域仿真

（1）仿真并查看状态窗口，可看到程序在每个时间间隔（1ns）都计算一次直到 50ns 得到最后一个数据后，仿真结束。

（2）插入一个列表（List）。首先查看 Vout 的 Dependency 关系。单击数据显示窗口左侧 1234 5678 按钮，弹出对话框，添加 Vout 数据，单击 Trace Options... 按钮，在弹出对话框的“Trace Expression”栏输入表达式：what（Vout），如图 8-15 所示。两次单击 OK 按钮后将看到对于 Vout 的依从属性，如图 8-16 所示。

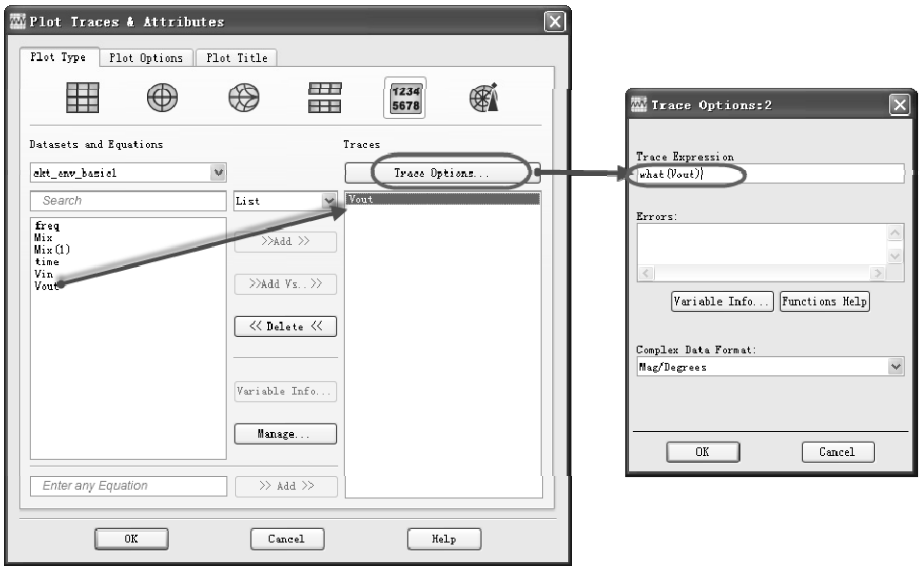


图 8-15　插入一个列表

（3）在数据显示窗口，单击左侧的按钮，弹出对话框，选择 Vin 数据，单击 >>Add >> 按钮，弹出“Circuit Envelope Simulation Data”对话框，选择“Magnitude of carrier in the time domain”显示方式，单击 OK 按钮，如图 8-17 所示。采用同样方式添加 Vout 数据，得到 Vin[1]和 Vout[1]信号的时域波形，如图 8-18 所示。

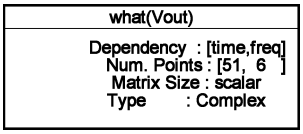


图 8-16 Vout 依从属性查看

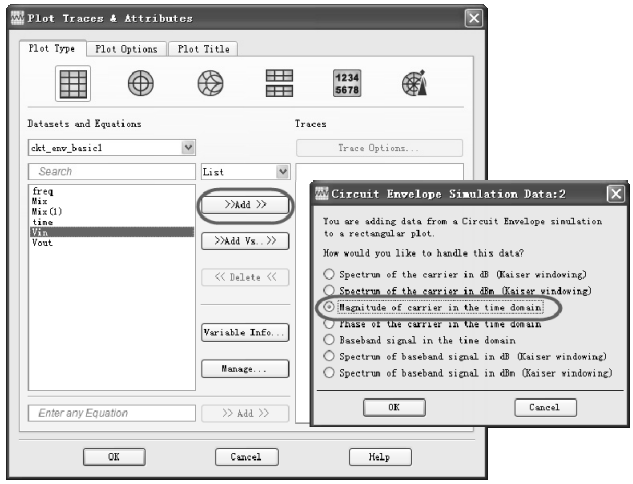


图 8-17 添加 Vin 数据

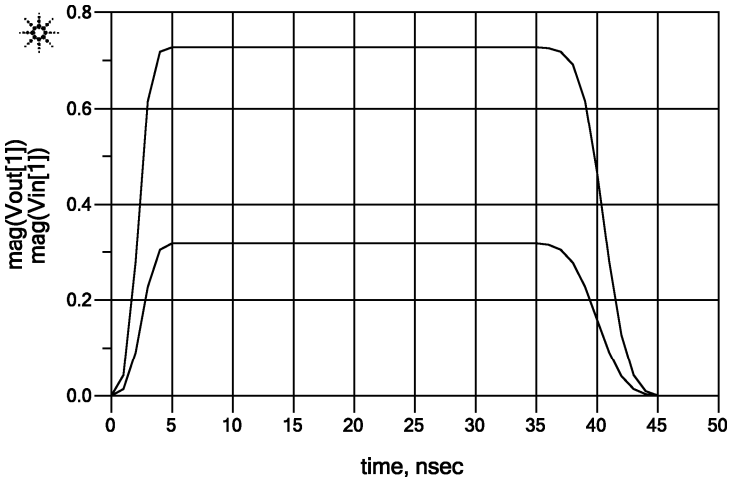


图 8-18 Vin[1]和 Vout[1]信号的时域波形

> 📖 [1]表示 1GHz 时的输入、输出时域波形。

（4）用鼠标左键双击图 8-16 空白处，弹出对话框，按步骤（3）再添加 Vout 数据，单击 Trace Options... 按钮后弹出对话框，在“Trace Expression”选项卡对话栏输入表达式 ts（Vout［1］）加入另外一条曲线，如图 8-19 所示。

> 📖 y= ts(x,tstart, tstop, numtpts, dim, windowType, windowConst, nptsspec)，执行频域到时域转换。例如，y= ts(Vout)返回一个(0, 20ps, …, 2ns)的时间序列。

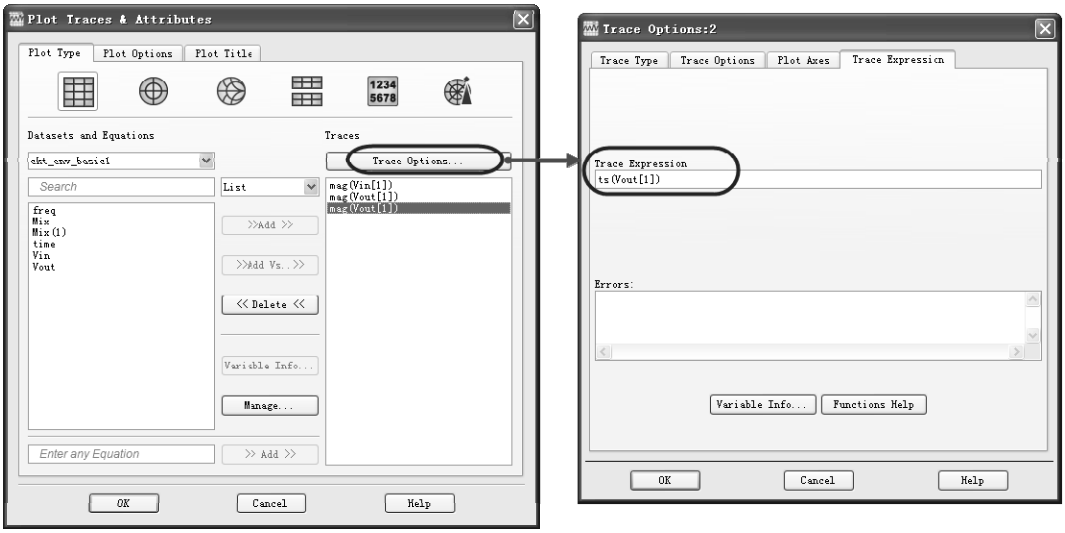


图 8-19　添加 ts（Vout［1］）对话框

（5）单击 OK 按钮，得到新的参数曲线，如图 8-20 所示，在图中放置两个标记，验证上升时间为 5ns。

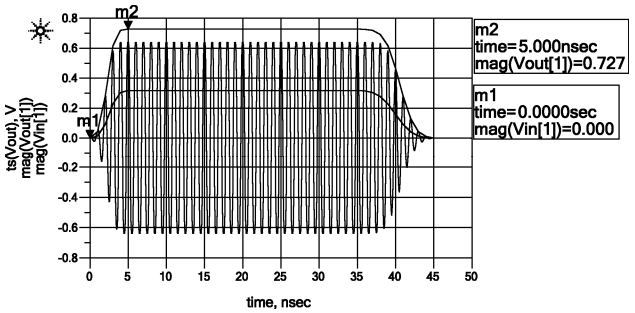


图 8-20　加入 ts(Vout)的时域波形

（6）观察曲线在低于取样时发生的变化。设置时间间隔为 10ns（打开原理图中包络仿真控制器，选中“Env Setup”选项卡，设置“Time step”为 10ns），当时间间隔大于上升时间时，得到的载波并不是正常的包络。在图 8-21 上，x 轴范围已经变大，同时标记位于 0 和 10ns 两点。

（7）插入另一个矩形图，观察频域中基波的幅度，增长箭头代表在上升时间（5ns）内脉冲载波增长的幅度。x 轴范围设置为 500～1 500MHz，如图 8-22 所示。

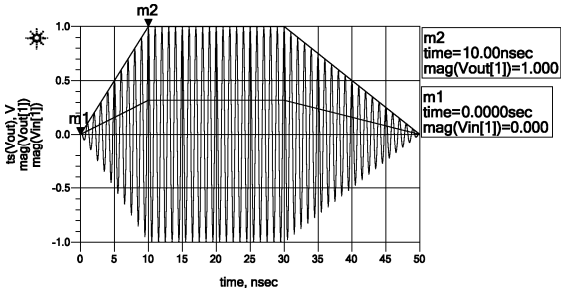


图 8-21　时间间隔为 10ns 时的时域波形

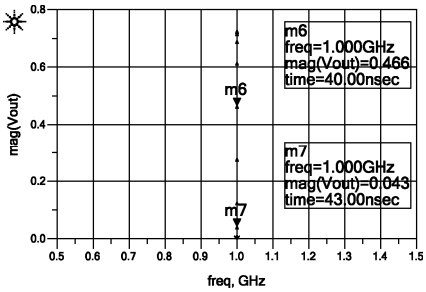


图 8-22　频域基波幅度图

4．放大器中加入失真仿真

（1）双击 Amplifier2 器件，参数设置为：

☺ S21=dbpolar(10,0)　S21=10dB，相位为 0°（dB 和相位用逗号分开）;

☺ S11=dbpolar(−50,0)，S22=dbpolar(−50,0)　S11 和 S22 是−50dB（回波损失或失配衰减）和 0°相位;

☺ 确保对 S21、S11 和 S22 使用 dbpolar 函数;

☺ S12=0　S12 也被设置为 0，表明没有反向泄漏（reverse leakage）;

☺ GainCompPower=5　增益压缩功率，单位默认为 dBm;

☺ GainComp=1.0dB　增益压缩值仅仅用来表明设置起的作用。

（2）设置 PtRF_Pulse 控件，参数设置为：

☺ OffRatio=0　超比率为 0;

☺ Delay=0nsec　时延为 0ns;

☺ P=dbmtow(10);

☺ Rise=5nsec　上升时间 5ns;

☺ Fall=10nsec　下降时间 10ns;

☺ Width=30nsec　脉冲宽度 30ns;

☺ Period=100nsec　周期 100ns。

（3）设置控制器的 Order=5 并保持时间间隔为 10 ns，如图 8-23 所示。

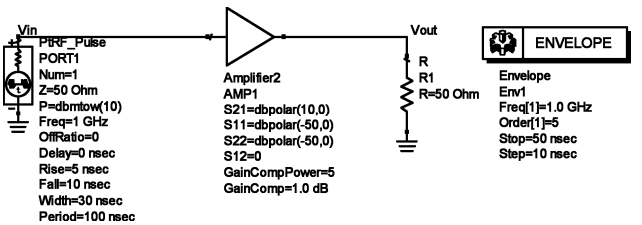


图 8-23　加入失真的电路原理图

（4）仿真并查看数据。如果自动范围调整功能（autoscalar）打开，时域图将被调整。如图 8-24 所示，频域图上，设置为刻度自动并如图 8-25 所示，在两张图上放置标记，由于放大器失真产生奇次谐波分量。在包络振幅里，这个值比 Vin 或 Vout 的幅度小。同时，因为取样很粗糙，所以包络形状不是很精确。

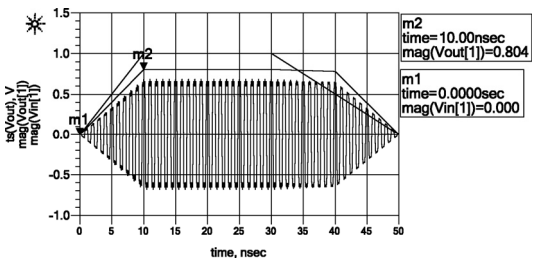


图 8-24　加入失真后 Vout 时域波形

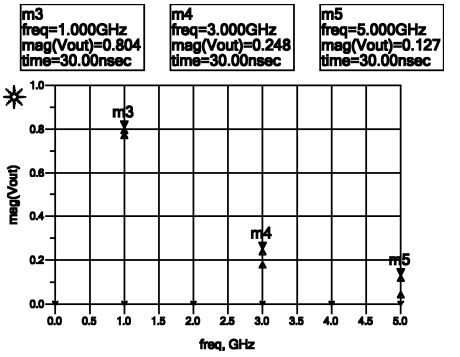


图 8-25　加入失真后 Vout 频谱波形

（5）修改时间间隔为 1ns，并再次仿真。仿真结果如图 8-26 所示。此时，Vout 包络形状正确，但是 Vin 和 Vout 仍然比包络幅度大，这是由于压缩的原因。为了证实这点，插入 Vout 数据列表并且禁用“(Suppress) Table Format”，如图 8-27 所示。然后下拉滚动条至 5ns 数据处。其中 3 次谐波相位相差 180°，使得在放大器中加入增益压缩合成包络幅度小于基频幅度。

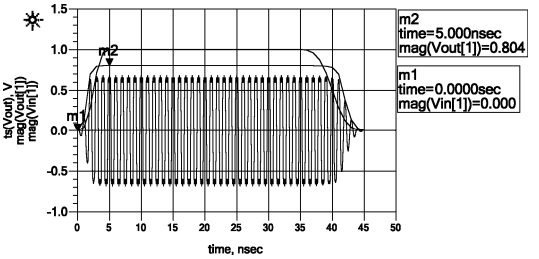


图 8-26　时间间隔为 1ns 的仿真结果

freq	Vout
time=3.000 nsec	
0.0000 Hz	0.000 / 0.000
1.000 GHz	0.798 / 1.016E-15
2.000 GHz	0.000 / 0.000
3.000 GHz	0.229 / 180.000
4.000 GHz	0.000 / 0.000
5.000 GHz	0.100 / -1.507E-14
time=4.000 nsec	
0.0000 Hz	0.000 / 0.000
1.000 GHz	0.803 / 2.657E-15
2.000 GHz	0.000 / 0.000
3.000 GHz	0.246 / -180.000
4.000 GHz	0.000 / 0.000
5.000 GHz	0.124 / -2.772E-14
time=5.000 nsec	
0.0000 Hz	0.000 / 0.000
1.000 GHz	0.804 / 5.917E-17
2.000 GHz	0.000 / 0.000
3.000 GHz	0.248 / 180.000
4.000 GHz	0.000 / 0.000
5.000 GHz	0.127 / -1.076E-14
time=6.000 nsec	
0.0000 Hz	0.000 / 0.000
1.000 GHz	0.804 / 2.672E-16
2.000 GHz	0.000 / 0.000
3.000 GHz	0.248 / 180.000
4.000 GHz	0.000 / 0.000
5.000 GHz	0.127 / -2.050E-14

图 8-27　Vout 数据列表

8.5.2　GSM 源包络仿真

GSM 调制是一种载波的相位调制（典型值为 900MHz），这里相位变化用“1”或“0”表示。下面分析含有 GSM 源的运算放大器包络仿真的结果。

1．建立原理图

（1）新建原理图，命名为 ckt_env_demod。

（2）从“Sources-Modulated”元件面板中，选择并放置一个 GSM 源并在输出端 *B* 点输入引脚标注 bits_out，其他参数设置如图 8-28 所示。

（3）设置源 Fnom=900MHz，Power=dbmtow（10）。

（4）从“System-Mod/Demod”元件面板中选择并放置两个解调器：FM_DemodTuned。设置两个解调器的 Fnom 参数为 900MHz。同时对每个输出端进行标注：fm_demod_in 和 fm_demod_out。这些将用来观察被解调的 GSM 信号（基带）。

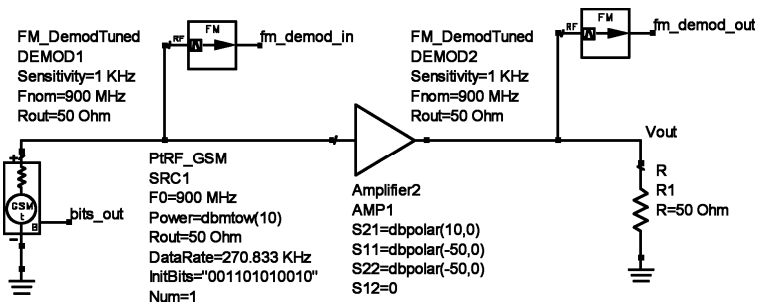


图 8-28　GSM 源放大器包络仿真电路原理图

> 在这个例子中可以使用相位解调器，但是使用调频解调器会更容易。如果设计解调器，可以运用这种典型的设计来测试电路。另外，可以参照 Example 目录中的 modulator/demodulator（调制／解调器）仿真的例子。

（5）添加 Vout 节点。在“Simulation-Envelope”元件面板中插入 Env1 控件，如图 8-29 所示，修改属性：

☺ Freq[1]=900MHz;

☺ Order[1]=10;

☺ Stop=t_stop;

☺ Step=t_step。

（6）在原理图中插入一个 VAR 控件，设置 t_stop 和 t_step 两个变量，如图 8-30 所示。



图 8-29　设置后的包络仿真器

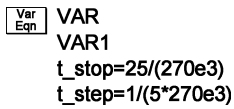


图 8-30　设置后的变量控件

> t_stop=25/（270e3），t_step=1/(5*270e3)。由于 GSM 信号调制带宽为 270kHz，t_stop 的计算以 270kHz 作为分母很方便，但并不是必须的，t_stop 约为 100μs。

2．仿真分析

（1）运行仿真按钮开始仿真。

（2）在数据显示窗口插入矩形图。选择 fm_demod_in 和 fm_demod_out 两个节点图作为时域基带信号，系统自动弹出一个对话框，选择“Baseband signal in the time domain”，如图 8-31 所示。解调基带波形如图 8-32 所示。

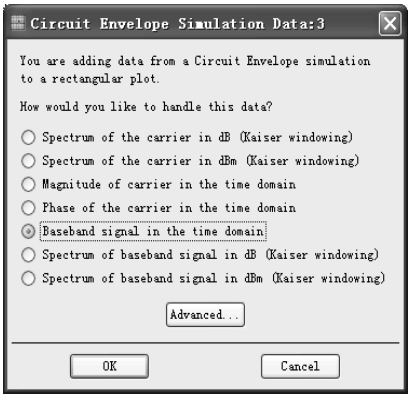


图 8-31　显示数据显示方式对话框

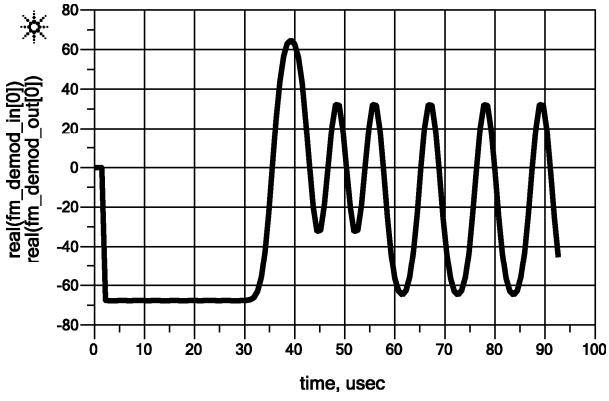


图 8-32　解调基带波形

> 这些轨迹将是实数，索引值为[0]，解调器只有在基带才输出信号。请注意因为没有失真，所以两条曲线是一样的。

3．用滤波器对相位失真进行仿真

（1）双击 Amplifier2，参数设置为：

☺ GainCompPower=5　增益压缩功率，单位默认为 dBm;

☺ GainComp=1.0dB　增益压缩值仅仅用来表明设置起的作用。

（2）在“Filters-Bandpass”元件面板中，选择 Butterworth 带通滤波器放置到放大器与源之间，如图 8-33 所示。因为只有窄带信号能通过放大器，所以这将造成一些失真，同时所有信号都能通过第一个解调器。

（3）插入 Vin 节点。

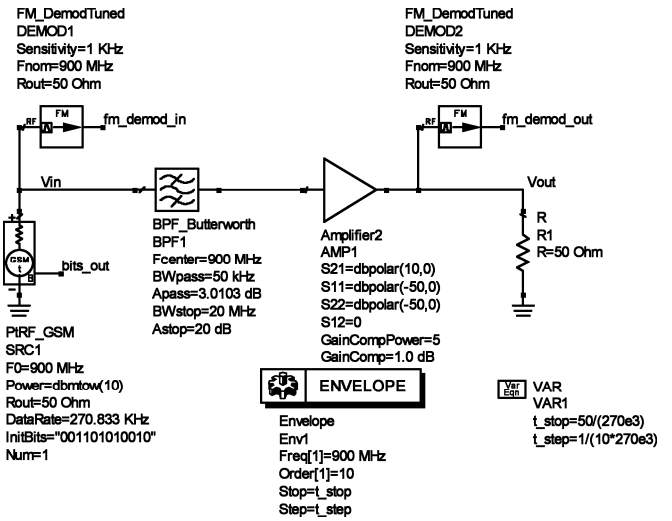


图 8-33　加入滤波器的电路原理图

（4）改变 t_step 为 270kHz 带宽的 10 倍：t_step=l/（10*270e3）。

（5）改变 t_stop 分子为 50（200μs）：t_stop=50/（270e3）。

（6）仿真并得到输入和输出调制曲线。

调制图形应该显示与图 8-34 所示相似的从输入到输出的失真和时延。

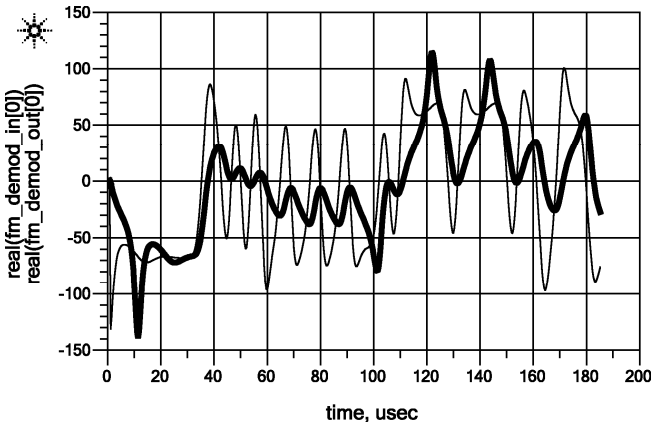


图 8-34　加入滤波器后的解调的基带波形

8.5.3 1.9GHz 的 GSM 放大器包络仿真

1．创建原理图

（1）打开先前的原理图设计 HB_2Tone，并以一个新的名称 ckt_env_gsm 保存。

（2）删除仿真控制器、变量等。

（3）分别插入包络控制器、PtRF_GSM、VAR 控件。

（4）仿真元件和变量设置如图 8-35 所示，其中要确保 bits_out 节点在 GSM 源上。

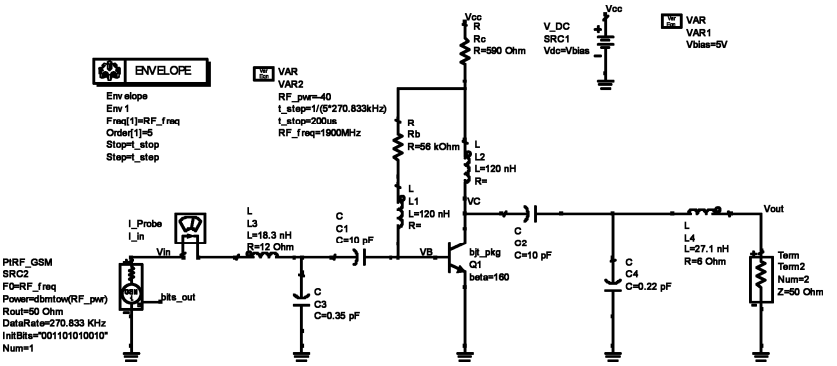


图 8-35　1.9GHz GSM 放大器包络电路原理图

2．仿真分析

（1）检查设置，然后仿真并查看状态窗口。

（2）仿真结束后，在数据显示窗口查看仿真数据。

（3）在数据显示窗口中插入一个 Vout 列表，同时在“Plot Options”选项卡中“Table Format”区域选中“Transpose Data”选项，如图 8-36 所示。现在，看到在每个时间间隔电路包络仿真器计算每个频点的值。滚动窗口到最后，可以在最后一个 t_stop=200μs 时间点看到最后一个点的值，如图 8-37 所示。

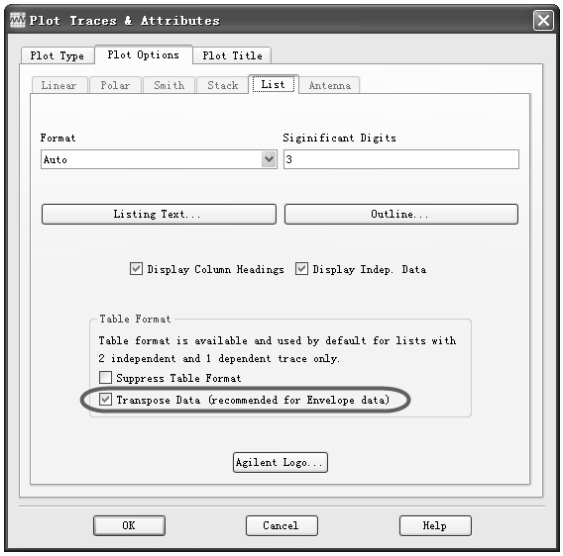


图 8-36 “Plot Options”选项卡

time	Vout					
	freq=0.000	...=1900000000.000	...=3800000000.000	...=5700000000.000	...=7600000000.000	...=9500000000.000
0.0000 sec	0.000 / 0.000	0.180 / -104.199	0.001 / 9.062	1.959E-5 / 136.313	8.622E-7 / -142.599	5.192E-8 / -66.891
738.5 nsec	1.266E-10 / 180.000	0.180 / -104.199	0.001 / 9.062	1.959E-5 / 136.313	8.622E-7 / -142.599	5.192E-8 / -66.890
1.477 usec	6.351E-10 / 0.000	0.180 / -122.173	0.001 / -26.917	1.958E-5 / 82.348	8.616E-7 / 145.445	5.187E-8 / -156.836
2.215 usec	3.945E-11 / 180.000	0.180 / -140.173	0.001 / -62.917	1.958E-5 / 28.347	8.617E-7 / 73.445	5.190E-8 / 113.210
2.954 usec	1.134E-10 / 180.000	0.180 / -158.173	0.001 / -98.917	1.958E-5 / -25.653	8.616E-7 / 1.444	5.187E-8 / 23.175
3.692 usec	1.003E-11 / 180.000	0.180 / -176.173	0.001 / -134.916	1.958E-5 / -79.652	8.615E-7 / -70.558	5.189E-8 / -66.847
4.431 usec	1.664E-11 / 0.000	0.180 / 165.827	0.001 / -170.917	1.958E-5 / -133.653	8.616E-7 / -142.549	5.185E-8 / -156.823
5.169 usec	5.067E-11 / 180.000	0.180 / 147.827	0.001 / 153.083	1.958E-5 / 172.347	8.615E-7 / 145.447	5.186E-8 / 113.147
5.908 usec	2.812E-11 / 180.000	0.180 / 129.827	0.001 / 117.083	1.958E-5 / 118.348	8.614E-7 / 73.446	5.188E-8 / 23.089
6.646 usec	3.212E-11 / 180.000	0.180 / 111.827	0.001 / 81.084	1.958E-5 / 64.347	8.617E-7 / 1.450	5.183E-8 / -66.811
7.385 usec	4.517E-11 / 0.000	0.180 / 93.827	0.001 / 45.084	1.958E-5 / 10.347	8.616E-7 / -70.546	5.182E-8 / -156.859
8.123 usec	4.005E-11 / 0.000	0.180 / 75.827	0.001 / 9.083	1.958E-5 / -43.653	8.615E-7 / -142.550	5.186E-8 / 113.119
8.862 usec	1.095E-11 / 0.000	0.180 / 57.827	0.001 / -26.916	1.958E-5 / -97.647	8.606E-7 / 145.402	5.208E-8 / 22.817
9.600 usec	1.552E-11 / 180.000	0.180 / 39.827	0.001 / -62.917	1.958E-5 / -151.653	8.616E-7 / 73.442	5.189E-8 / -66.814
10.34 usec	2.819E-11 / 0.000	0.180 / 21.827	0.001 / -98.917	1.958E-5 / 154.347	8.616E-7 / 1.443	5.188E-8 / -156.822
11.08 usec	9.802E-12 / 0.000	0.180 / 3.827	0.001 / -134.916	1.958E-5 / 100.347	8.616E-7 / -70.553	5.188E-8 / 113.154
11.82 usec	1.746E-11 / 180.000	0.180 / -14.173	0.001 / -170.917	1.958E-5 / 46.348	8.616E-7 / -142.557	5.188E-8 / 23.180
12.55 usec	2.420E-11 / 0.000	0.180 / -32.173	0.001 / 153.084	1.958E-5 / -7.653	8.616E-7 / 145.446	5.188E-8 / -66.831
13.29 usec	1.508E-11 / 180.000	0.180 / -50.173	0.001 / 117.083	1.958E-5 / -61.652	8.616E-7 / 73.445	5.187E-8 / -156.832
14.03 usec	2.195E-11 / 0.000	0.180 / -68.173	0.001 / 81.083	1.958E-5 / -115.652	8.616E-7 / 1.444	5.188E-8 / 113.164
14.77 usec	3.543E-12 / 180.000	0.180 / -86.173	0.001 / 45.083	1.958E-5 / -169.653	8.616E-7 / -70.556	5.188E-8 / 23.164
15.51 usec	6.422E-12 / 0.000	0.180 / -104.173	0.001 / 9.083	1.958E-5 / 136.347	8.616E-7 / -142.556	5.188E-8 / -66.836

图 8-37　Vout 数据列表

（4）用 Kaiser 窗口绘制 Vout 的载波频谱图，如图 8-38 所示。放置两个标记。在图 8-39 所示的仿真曲线上，测量输出 GSM 信号的带宽（大约为 270kHz）。

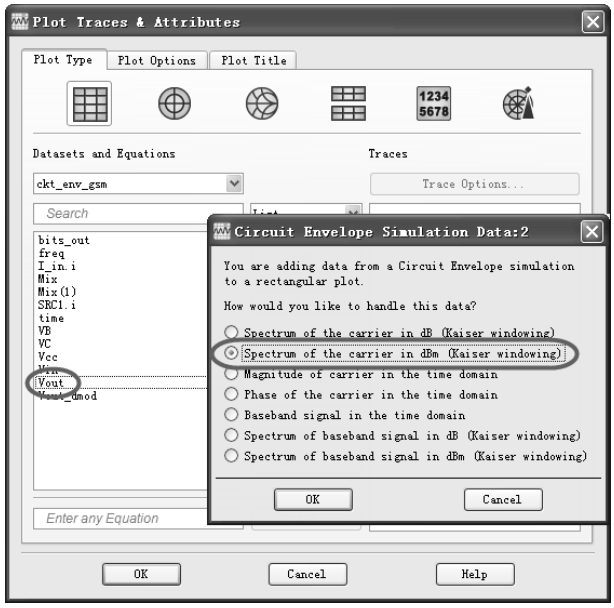


图 8-38　添加输出显示方式

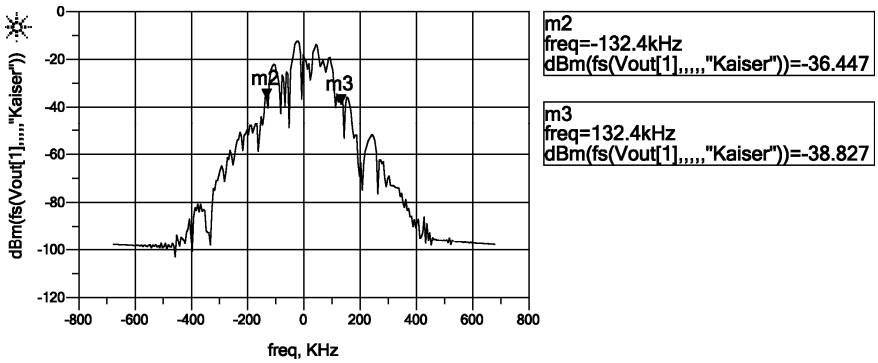


图 8-39　Vout 载波频谱图

> 🕮 Kaiser 窗口将保证每一个和最后一个时间数据点为 0，这会改善所计算频谱的动态范围，同时降低噪声基底，通过对话框在默认状态下 Kaiser 窗观察频谱数据。它假设载波索引值是[1]。

（5）在图 8-39 中，插入与 Vout 相同数据格式的 Vin 曲线，并用标记来验证增益大小。输入、输出载波放大倍数对比如图 8-40 所示。

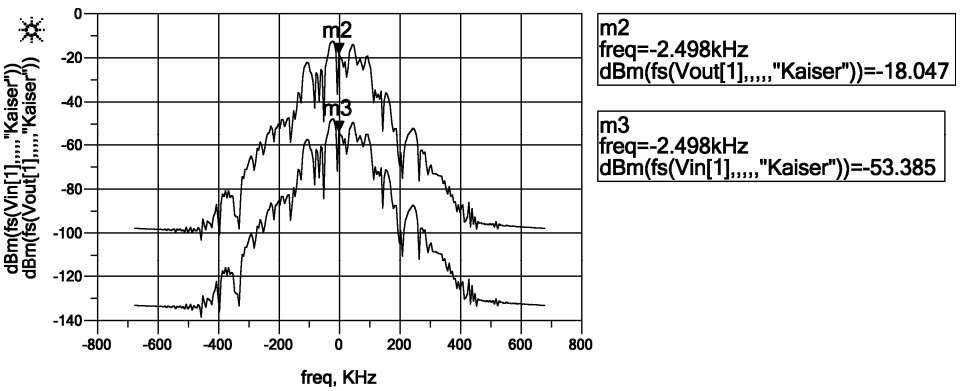


图 8-40　输入、输出载波放大倍数对比

（6）在数据显示窗口，单击工具栏按钮，插入 Vout 数据，弹出对话框，选择“Fundamental tone for all time points”项，得到一个包含所有时间点的输出曲线，如图 8-41 所示。

（7）在数据显示窗口，插入 Vout 幅度矩形图，如图 8-42 所示。正如所看到的，两个图的振幅幅度大小没有什么变化。对于 GSM 来说，这说明因为 GSM 是相位调制，放大器对于基带只增加很小或是没有失真。

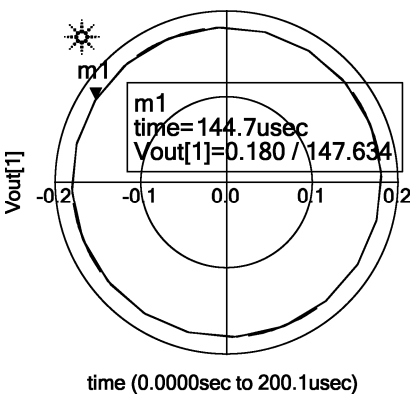


图 8-41　Vout[1]时域波形

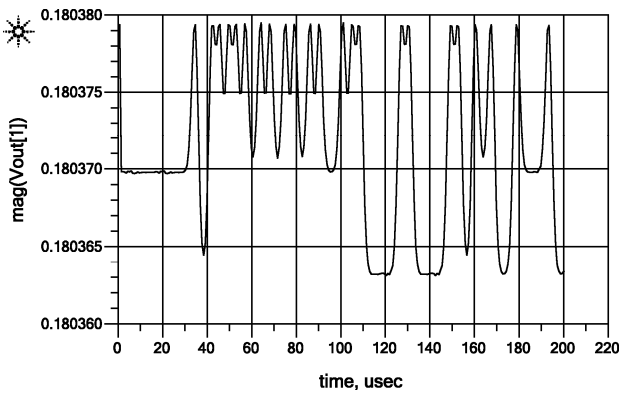


图 8-42　时域 Vout[1]振幅幅度

（8）在数据显示窗口，插入 Vout 相位曲线，如图 8-43 所示。注意到该图 x 轴 0～200μs 可以观察 200μs 以内的相位变化。y 轴是 0° ～±180°，类似一个网络分析仪。同时，插入 bits_out 矩形图，这是从源输出的原始数据，如图 8-44 所示。

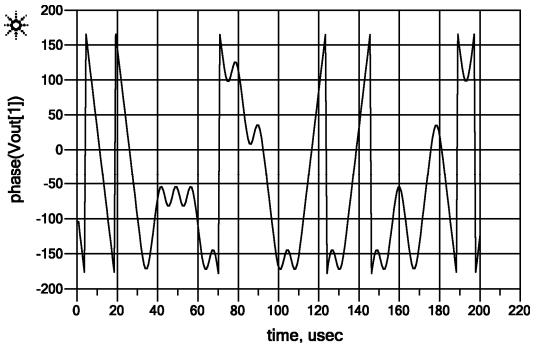


图 8-43　时域 Vout 相位

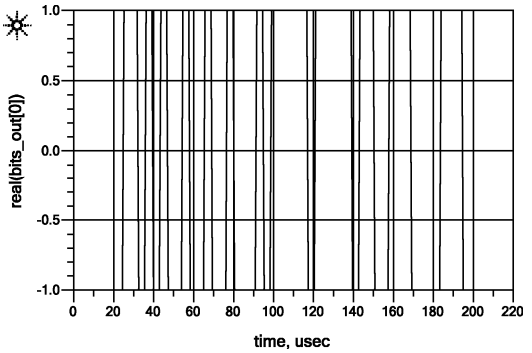


图 8-44　bits_out 数据图

（9）在数据显示窗口中，插入如图 8-45 所示的 baseband 方程，unwrap 函数的功能是从绝对相位中去掉±180°。diff 函数将区分展开的（unwrapped）倾斜度。除以 360 将以 Hz 表示数值。

```
Eqn baseband=diff(unwrap(phase(Vout[1]))/360)
```

图 8-45　数据解调方程

（10）绘制 baseband 数据曲线，如图 8-46 所示。经放大器大约 20μs 延迟后信号输出，标记 m6 表明了在 *x* 轴等于 38μs 的地方，对载波大约有 65kHz 的偏差。

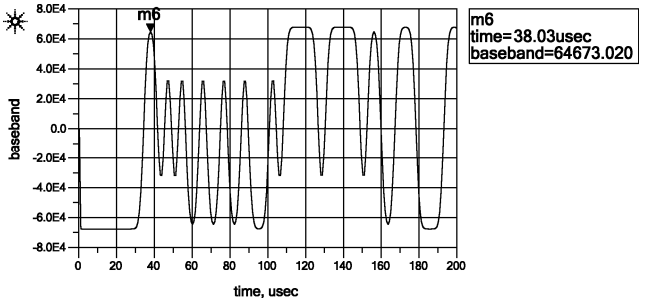


图 8-46　baseband 数据曲线

（11）图 8-46 中，加入 bits_out[0]曲线，数据以 Baseband signal in the domain 方式显示，如图 8-47 所示。

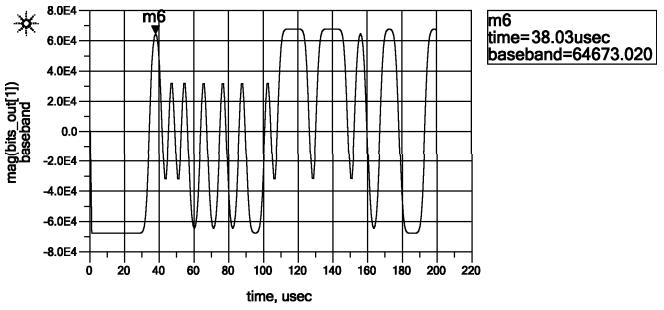


图 8-47　包含 baseband 和 bits_out[0]的数据曲线

（12）双击 bits_out 进行编辑，在“Plot Axes”选项卡中选择“Right Y-axis”。在“Plot Options”中，去掉自动刻度并重置右边 y 轴范围-1.25～1.25。最后，bits_out[0]信号产生 10μs 的延迟，如图 8-48 所示。

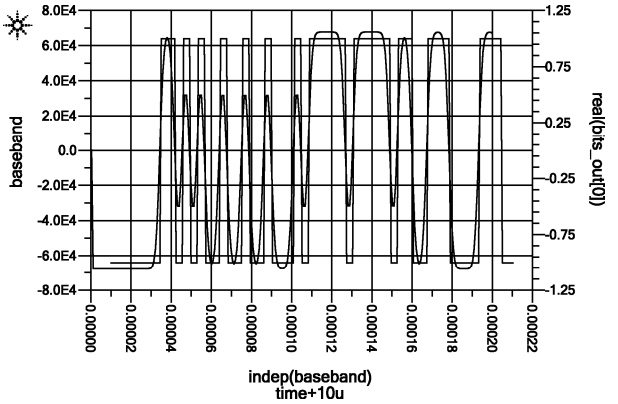


图 8-48　baseband 和 bits_out［0］的波形比较

> 10μs 的移动是通过放大器产生的延迟。现在读者应该对输入到输出基带有一个完全的比较了。比较结果，相位数据经展开微分后的结果与 FM_DemadTuned 调制器元件相同。

8.5.4　信道功率仿真

（1）在数据显示窗口菜单栏上选择【Page】→【New Page】，并按图 8-49 命名为 channel pwr。

（2）在新建页面窗口中，建立如图 8-50 所示的方程。limits 方程定义了调制带宽。channel_pwr 方程使用了 channel_power_vr 函数计算信号的基波功率。这里，vr 表示在计算中使用的是电压而不是电流。方程中 Vout[1]是 1 900MHz 的频点。同时，50 是系统阻抗，“Kaiser”是一个降低噪声基底的窗口，加 30 是把最后值转化为 dBm（30dBm=0.001W）。

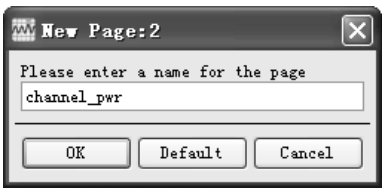


图 8-49　“New Page”窗口

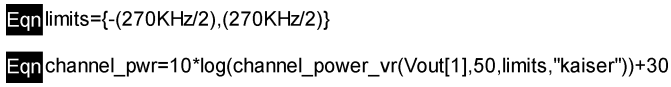


图 8-50　计算信道功率方程

（3）channel_pwr 参数结果如图 8-51 所示，在此将看到在 GSM 信号带宽里的功率。

channel_pwr
-4.886

图 8-51　信道功率数据列表

8.6　思考题

（1）在图 8-28 所示原理图上描述功率并观察输出端的变化。

（2）在 1.9GHz GSM 放大器的仿真中，在输出端使用 FM 解调器比较位输入和位输出的关系。

（3）进入范例文件：examples\Tutorial\ModSource_prj\Pi4DQPSK，复制到读者目录下并运行仿真，结合例程给出的参数分析仿真数据。

第 9 章　功率分配器的设计与仿真

在射频/微波电路中，为了将功率按一定比例分成两路或多路，需要使用功率分配器（简称功分器）。反过来使用的功率分配器是功率合成器。在近代射频/微波大功率固态发射源的功率放大器中广泛地使用功分器，而且通常功分器是成对使用的，先将功率分成若干份，然后分别放大，再合成输出。

在20世纪40年代，MIT辐射实验室（Radiation Laboratory）发明和制造了种类繁多的波导型功分器。它们包括E和H平面波导T型结、波导魔T和使用同轴探针的各种类型的功分器。在20世纪50年代中期到60年代，又发明了多种采用带状线或微波技术的功分器。平面型传输线应用的增加，也导致了新型功分器的开发，诸如Wilkinson分配器、分支线混合网络等。

本章分析功分器的设计方法，并利用ADS2012设计中心频率为750MHz的集总参数比例型功分器和中心频率为1GHz的集总参数等分型功分器，进而给出中心频率为1GHz分布参数（Wilkinson）功分器的电路和版图设计实例。

9.1　功分器的基本原理

一分为二功分器是三端口网络结构，如图 9-1 所示。信号输入端的功率为 P_1，而其他两个端口的功率分别为 P_2 和 P_3。

由能量守恒定律可知：

$$P_1 = P_2 + P_3 \tag{9-1}$$

如果 P_2（dBm）=P_3（dBm），三端口功率间的关系可写成：

$$P_2\text{（dBm）}=P_3\text{（dBm）}=P_1\text{（dBm）}-3\text{dB}$$

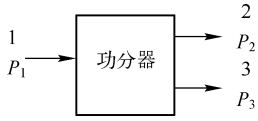


图 9-1　功分器示意图

当然，P_2 并不一定要等于 P_3，只是相等的情况在实际电路中最常用。因此，功分器可分为等分型（P_2=P_3）和比例型（P_2=kP_3）两种类型。

功分器的主要技术指标包括频率范围、承受功率、主路到支路的分配损耗、输入与输出间的插入损耗、支路端口间的隔离带、每个端口的电压驻波比等。

【频率范围】这是各种射频/微波电路的工作前提，功分器的设计结构与工作频率密切相关。必须首先明确功分器的工作频率，才能进行下面的设计。

【承受功率】在功分器/合成器中，电路元件所能承受的最大功率是核心指标，它决定了采用什么形式的传输线才能实现设计任务。一般来说，传输线承受功率由小到大的次序是微带线、带状线、同轴线、空气带状线、空气同轴线，要根据设计任务来选择用何种传输线。

【分配损耗】主路到支路的分配损耗实质上与功分器的主路分配比 A_d 有关。其定义为

$$A_d = 10\lg\frac{P_{in}}{P_{out}} \tag{9-2}$$

式中，$P_{in}=kP_{out}$。例如，两等分功分器的分配损耗是 3dB，四等分功分器的分配损耗是 6dB。

【插入损耗】输入与输出间的插入损耗是由于传输线（如微带线）的介质或导体不理想等因素产生的。考虑输入端的驻波比所带来的损耗，插入损耗 A_i 定义为

$$A_i = A - A_d \tag{9-3}$$

A 是在其他支路端口接匹配负载，主路到某一支路间的传输损耗，其为实测值。A 在理想状态下为 A_d。在功分器的实际工作中，几乎都是用 A 作为研究对象的。

【隔离带】支路端口间的隔离带是功分器的另一个重要指标。如果从每个支路端口输入功率只能从主路端口输出，而不应该从其他支路输出，这就要求支路之间有足够的隔离度。在主路和其他支路都接匹配负载的情况下，i 口和 j 口的隔离度定义为

$$A_{ij} = 10\lg\frac{P_{ini}}{P_{outj}} \tag{9-4}$$

隔离度的测量也可按照这个定义进行。

【驻波比】每个端口的电压驻波比越小越好。

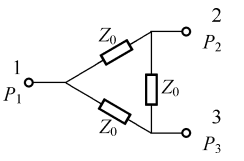
9.2　集总参数功分器设计及仿真

9.2.1　等分型功分器

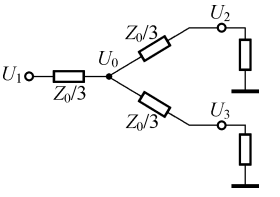
根据电路使用元件的不同，功分器可分为电阻式和 L–C 式两种类型。

1．电阻式

电阻式电路仅利用电阻设计，按结构分成△形和丫形，如图 9–2 所示。



（a）△形



（b）丫形

图 9–2　电阻式功分器

图 9–2 中 Z_0 是电路特性阻抗，在高频电路中，不同频段的特性阻抗不同。这种电路的优点是频宽大，布线面积小，设计简单；缺点是功率衰减较大（6dB）。如图 9–2（b）所示，设 Z_0=50Ω，则

$$U_0 = \frac{1}{2}\times\frac{4}{3}U_1 = \frac{2}{3}U_1$$

$$U_2 = U_3 = \frac{3}{4}U_0$$

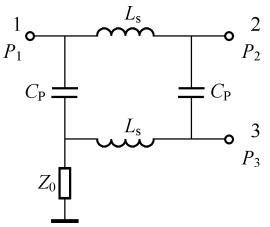
$$U_2 = \frac{1}{2}U_1$$

$$20\lg\frac{U_2}{U_1} = -6\text{dB}$$

2．L-C 式

这种电路利用电感及电容进行设计，按结构分成低通型和高通型两种类型，如图 9–3 所示，下面分别给出其参数的计算公式。

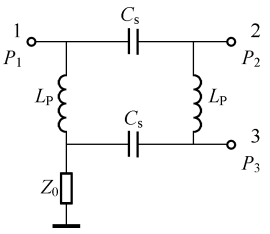
（1）低通型。



（a）低通型

$$\left.\begin{aligned} L_s &= \frac{Z_0}{\sqrt{2}\omega_0} \\ C_p &= \frac{1}{\omega_0 Z_0} \\ \omega_0 &= 2\pi f_0 \end{aligned}\right\} \tag{9-5}$$

（2）高通型。



（b）高通型

$$\left.\begin{aligned} L_p &= \frac{Z_0}{\omega_0} \\ C_s &= \frac{\sqrt{2}}{\omega_0 Z_0} \\ \omega_0 &= 2\pi f_0 \end{aligned}\right\} \tag{9-6}$$

图 9-3　L-C 式集总参数功分器

集总参数功分器的设计过程是先确定电路结构，再计算出各个电感、电容或电阻的值，最后，按照确定的电路结构进行设计。

9.2.2　等分型功分器设计实例

设计工作频率 f_0=1GHz 的功分器，特性阻抗为 Z_0=50Ω，功率比例为 k=0.5，且要求在 1±0.02GHz 的范围内 S11≤−14dB，S21≥−4dB，S31≥−4dB。

1．电路结构的选择及参数计算

选择高通型 L-C 式电路结构，如图 9-3（b）所示。按照式（9-6）计算得 $L_p = 7.96\text{nH}$，$C_s = 4.5\text{pF}$。

2．ADS 设计与仿真

（1）创建新项目，新建项目空间，命名为 chapter9_wrk，其他选项默认。新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 Aliquot。

（2）功分器电路设计：在“Lumped-Components”类中，分别选择控件、、，在“Simulation-S_Param”类中，分别选择控件、，放置到原理图中的合适位置。在工具栏中单击按钮，放置各端口接地，双击，修改属性，要求扫描频率为 0.9～1.1GHz，扫描步长为 0.01GHz。功分器仿真电路原理图如图 9-4 所示。

（3）功分器电路仿真：单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。单击显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击 Add 按钮，弹出设置单位（这里选择 dB）窗口，单击两次 OK 按钮后，窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线。用同样的方法依次加入 S31、S21，得到波形图如图 9-5 所示。

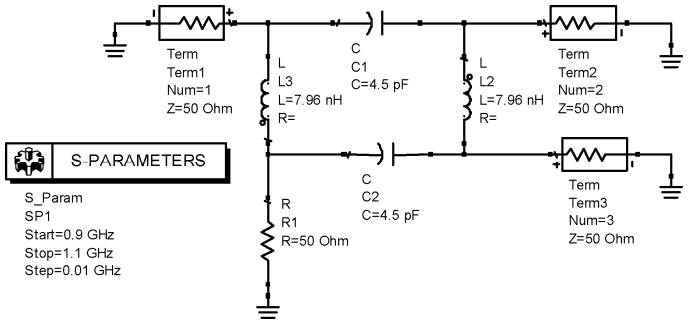


图 9-4　功分器仿真电路原理图

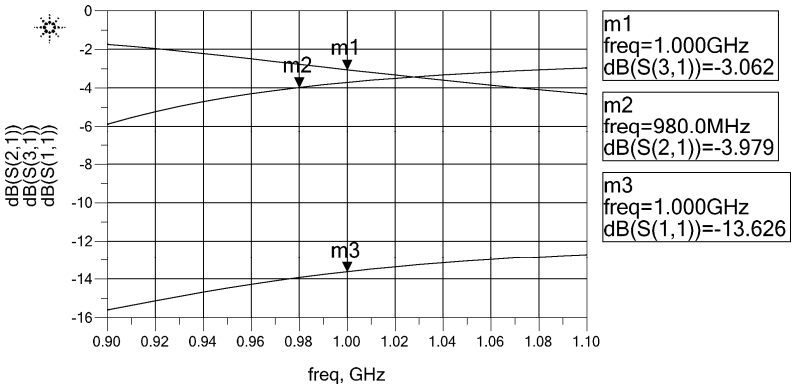


图 9-5　功分器仿真曲线

9.2.3　比例型功分器

比例型功分器的两个输出端口功率不相等。假定一个支路端口与主路端口的功率比为 k，可按照下面公式计算低通型 L-C 式集总参数比例功分器。

$$\left.\begin{aligned}
&P_3 = kP_1 \\
&P_2 = (1-k)P_1 \\
&\left\{\frac{Z_s}{Z_0}\right\}^2 = 1-k \\
&\left\{\frac{Z_s}{Z_p}\right\}^2 = k \\
&Z_s = Z_0\sqrt{1-k} \\
&L_s = \frac{Z_s}{\omega_0} \\
&Z_p = Z_0\sqrt{\frac{1-k}{k}} \\
&C_p = \frac{1}{\omega_0 Z_p}
\end{aligned}\right\} \tag{9-7}$$

其他形式的比例型功分器参数可用类似的方法进行计算。

9.2.4 比例型功分器设计实例

设计工作频率 f_0=750MHz 的功分器，特性阻抗为 Z_0=50Ω，功率比例为 k=0.1，且要求在 750±50MHz 的范围内 S11≤−10dB，S21≥−2dB，S31≥−12dB。

1．电路结构选择及参数计算

选择低通型 L-C 式电路结构如图 9-3（a）所示，代入参数计算得 $L_s=10\text{nH}$，$C_p=1.4\text{pF}$。

2．ADS 设计与仿真

（1）创建新项目，在 chapter9_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 prdivider。

（2）功分器电路设计：在“Lumped-Components”类中，分别选择控件、、，在“Simulation-S_Param”类中，分别选择控件、，放置到原理图中的合适位置。单击图标，放置两个地，双击，修改属性，要求扫描频率为 0.6～0.8GHz，扫描步长设为 0.01GHz，功分器仿真电路原理图如图 9-6 所示。

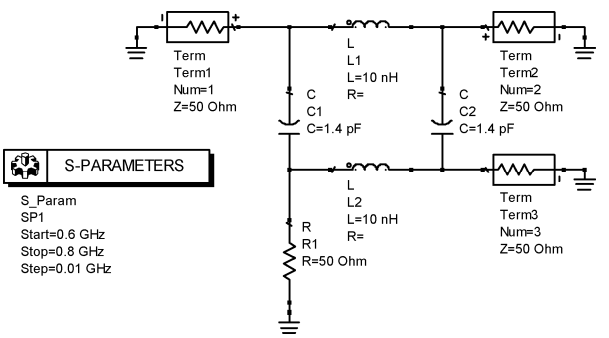


图 9-6 功分器仿真电路原理图

（3）功分器电路仿真：单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击 Add 按钮弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次 OK 按钮后，窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线。用同样的方法依次加入 S22、S21、S12 参数的曲线，由于功分器的对称结构，S11 与 S22，以及 S21 与 S12 曲线是相同的。仿真曲线如图 9-7 所示。

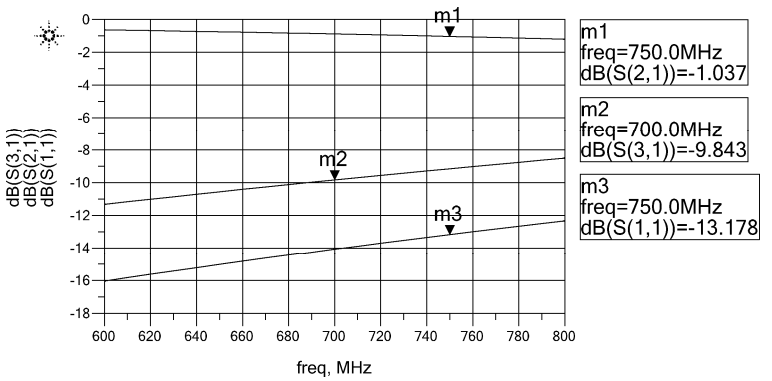
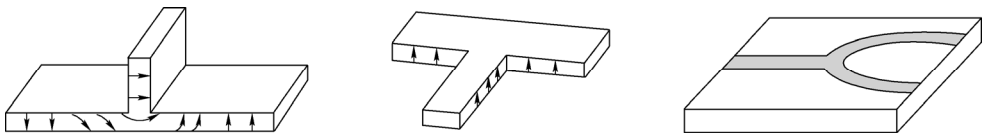


图 9-7 仿真曲线

9.3　Wilkinson 功分器设计及仿真

分布参数功分器最简单的类型是 T 型结，它是具有一个输入和两个输出的三端口网络，可用于功率分配或功率合成。实际上，T 型结分布参数功分器可用任意类型的传输线制作。图 9-8 给出了一些常用的波导型和微带型 T 型结。由于存在传输线损耗，这种结的缺点是不能同时在全部端口匹配，同时，在输出端口之间没有任何隔离。

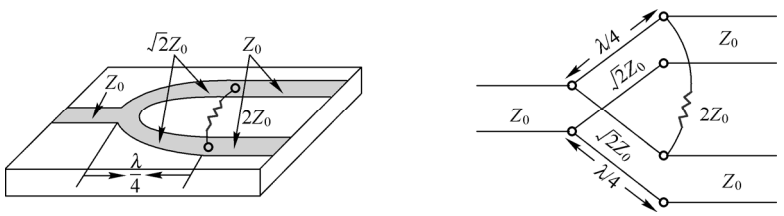


（a）E 平面波导 T 型结　（b）H 平面波导 T 型结　（c）微带 T 型结

图 9-8　各种 T 型结功分器

根据微波工程的理论可知，有耗三端口网络可制成全部端口匹配，并在输出端口之间有隔离。Wilkinson 功分器就是这样一种网络。

Wilkinson 功分器可制成任意比例功分器，但一般考虑等分情况。这种功分器常制作成微带线或带状线形式，如图 9-9（a）所示。图 9-9（b）给出了相应的等效传输线电路。可以利用两个较简单的电路（在输出端口用对称和反对称源驱动）对电路进行分析。具体分析过程请读者自行查阅相关资料。



（a）等分微带线形式功分器　（b）等效传输线电路

图 9-9　Wilkinson 功分器

9.3.1　Wilkinson 功分器设计

利用 $\varepsilon_r = 4.3$，厚度 h=0.8mm 的介质基板，设计 Wilkinson 功分器。通带为 0.9～1.1GHz，功分比为 1∶1，带内各端口反射系数 S11、S22、S33 小于−20dB，两输出端隔离度 S23 小于−25dB，传输损耗 S21 和 S31 小于 3.1dB。

根据设计要求，中心频率为 1.0GHz，输入阻抗为 50Ω，并联电阻为 50Ω。

（1）创建新项目，在 chapter9_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 wilkinson。

（2）在“Tlines-Microstrip”类中，选择，双击并修改属性。选择微带控件、、及，分别放置在原理图区中。选择画线工具按照图 9-10 所示将电路连接好，并双击每个元件设置参数。

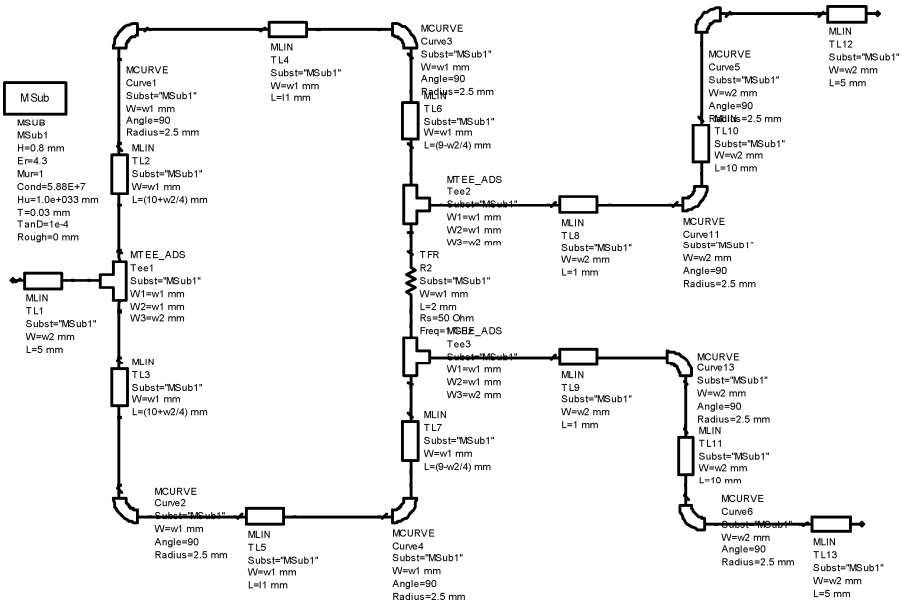


图 9-10　Wilkinson 功分器连接方式

（3）滤波器两边的引出线是特性阻抗为 50Ω 的微带线，它的宽度 *W* 由微带线计算工具得到。单击菜单栏【Tools】→【LineCalc】→【Start Linecalc】，出现新窗口，如图 9-11 所示。在窗口的“Substrate Parameters”栏中填入与 MSUB 中相同的微带线参数。在“Component Parameters”栏中填入中心频率 1GHz。“Physical”栏中的“W”和“L”分别表示微带线的宽和长。“Electrical”栏中的“Z0”和“E_Eff”分别表示微带线的特性阻抗和相位延迟。单击“Synthesize”和“Analyze”栏中的箭头，完成上面参数间的换算。计算过程中，出现另一个窗口显示当前运算状态及错误信息。

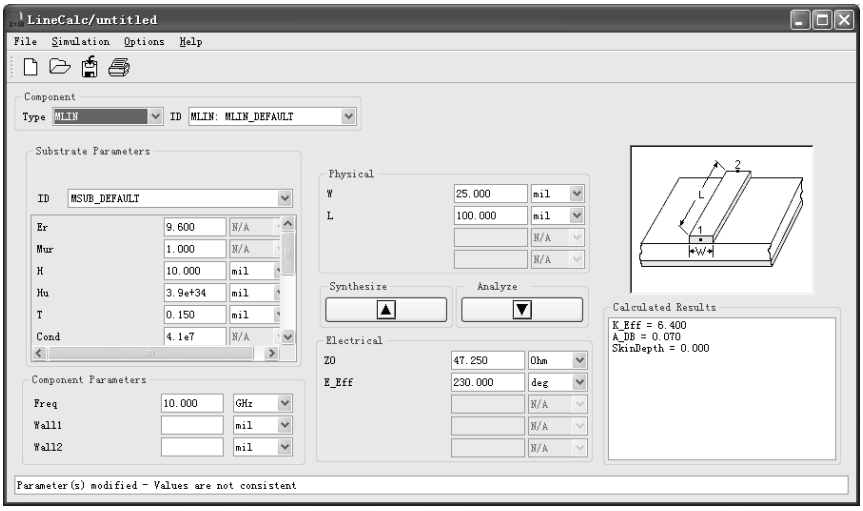


图 9-11　LineCalc 主界面

> 填入 Z_0=50Ω可以算出微带线的线宽为 1.52mm。填入 Z_0=70.7Ω和 E_Eff=90deg 可以算出微带线的线宽为 0.79mm 和长度为 42.9mm。

（4）单击工具栏 VAR 图标，在原理图中放置 VAR 控件，双击该图标弹出设置窗口，依次添加微带线的 W、L、S 参数，如图 9-12 所示。在“Instance Name”栏中填变量名称，“Variable Value”栏中填变量的初值，单击 Add 按钮添加变量。单击 Tune/Opt/Stat/DOE Setup... 按钮，弹出菜单，选择“Tuning”选项卡，设置变量的取值范围。Enabled/Disabled 表示该变量是否能被优化。

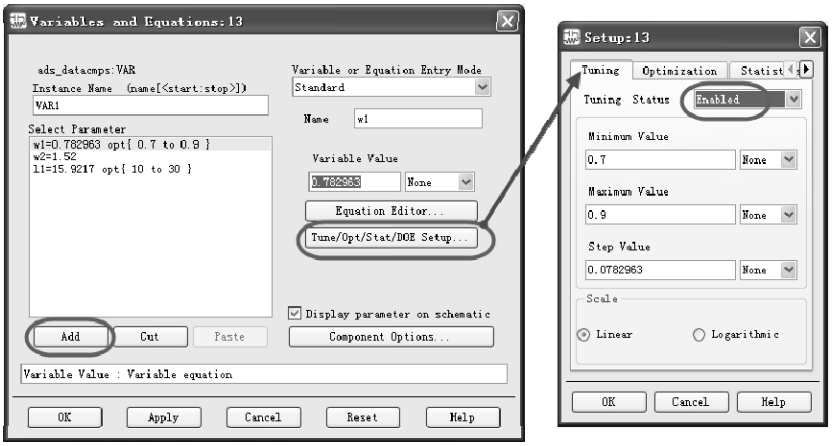


图 9-12　变量设置

> 中间微带线长度 L_1 及宽度 W_1 为优化变量。设 L_1 初始值=15mm，由于 W_1 为微带线的宽度，最窄只能取 0.2mm，最好取 0.5mm 以上。50Ω微带线宽 W_2=1.52mm。

9.3.2　电路仿真与优化

（1）在原理图设计窗口中选择“Simulation-S_Param”元件类，在面板中选择 Term 放置在功分器三个端口上，定义端口 1、2 和 3。单击接地图标，放置三个地，并按照图 9-13 所示连接电路。选择 SP 控件放置在原理图中，并设置扫描的频率范围和步长，频率范围根据功分器的指标确定。

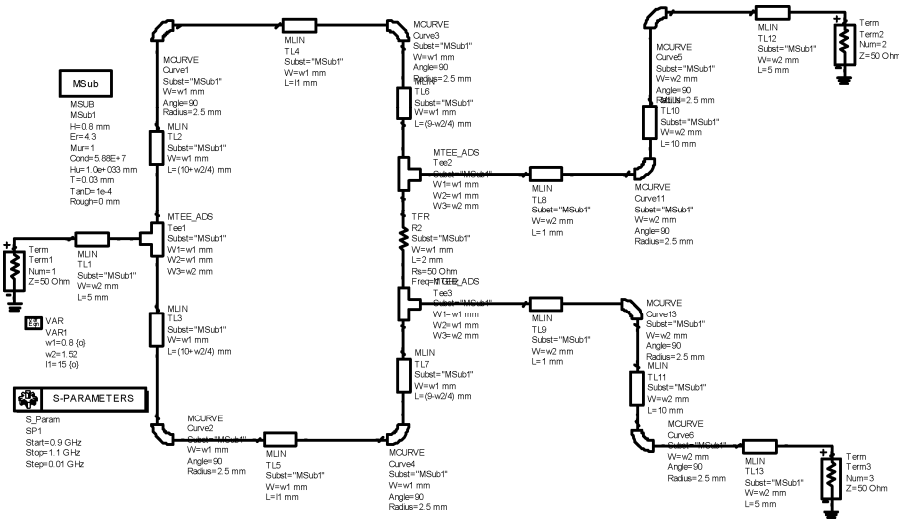


图 9-13　Wilkinson 功分器仿真电路

（2）在原理图设计窗口中选择“Optim/Stat/Yield/DOE”类，在面板中选择Optim控件放置在原理图中，双击该控件设置优化方法及优化次数，如图 9-14 所示。

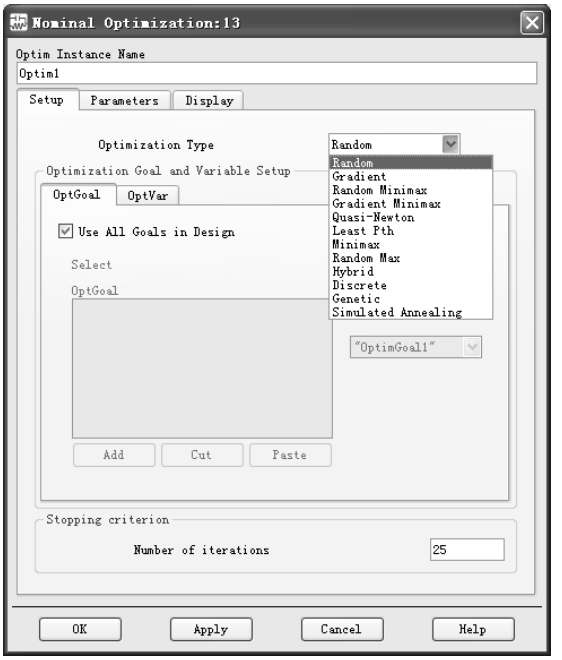


图 9-14　优化属性设置

常用的优化方法有 Random（随机）、Gradient（梯度）等。随机法通常用于大范围搜索，梯度法则用于局部收敛。本例选择随机法优化，优化次数为 25 次。

（3）选择Goal控件，设置四个优化目标。由于电路的对称性，S31 和 S33 不用设置优化。S11 和 S22 分别设定输入、输出端口的反射系数，S21 设定功分器通带内的衰减情况，S23 设定两个输出端口的隔离度。加入优化目标后的原理图如图 9-15 所示。

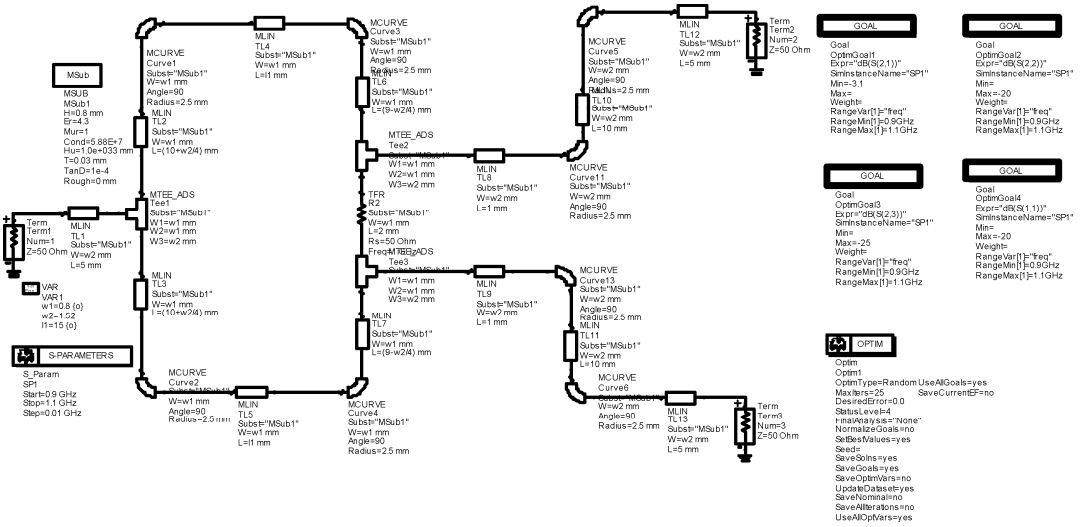


图 9-15　加入优化目标后的原理图

（4）设置完优化目标后，保存电路图，然后进行参数优化仿真。单击工具栏按钮，开始优化，弹出优化窗口，如图 9-16 所示。

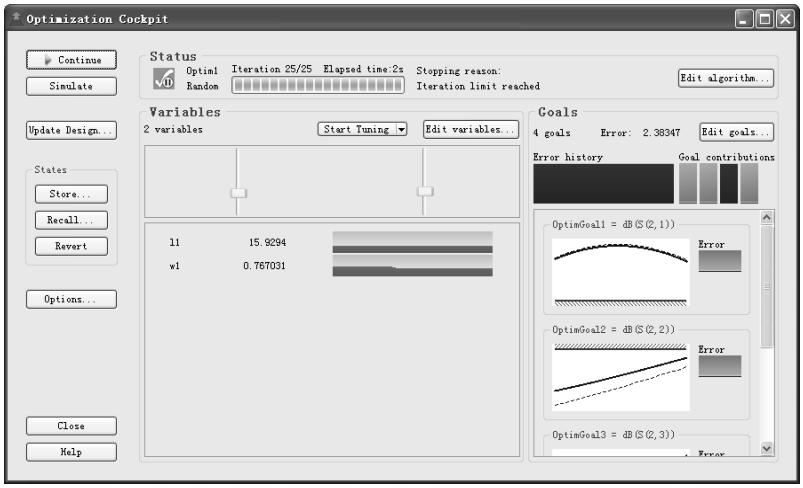


图 9-16　优化窗口

（5）单击 Simulate 按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)，即 S11 参数，单击 Add 按钮弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次 OK 按钮后，数据显示窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线。用同样的方法依次加入 S31、S21、S23 参数曲线，如图 9-17 所示。

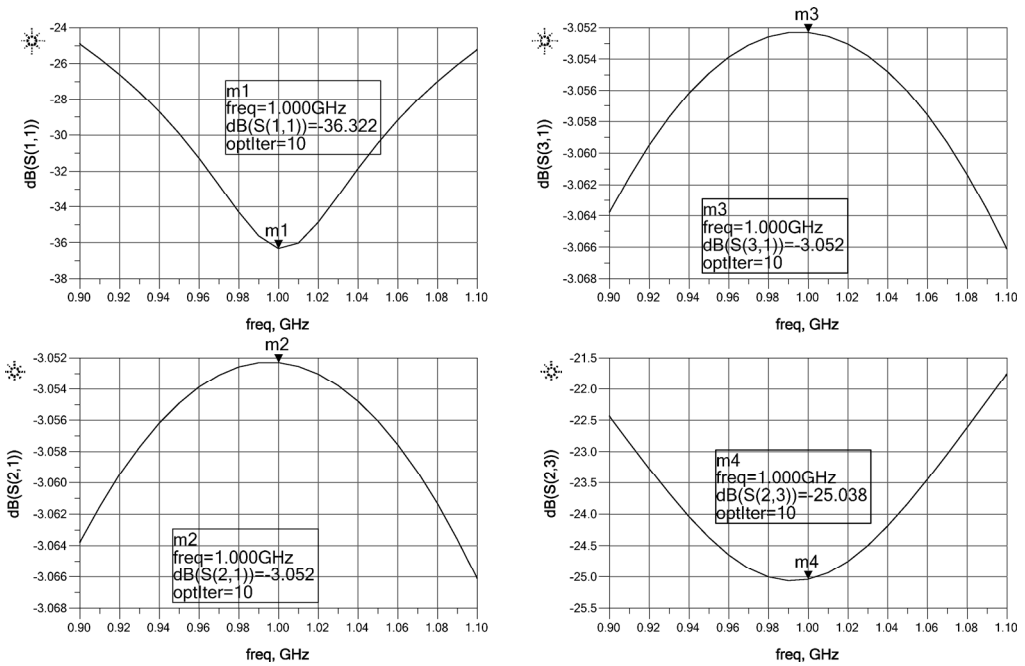


图 9-17　仿真曲线

观察 S 参数曲线是否满足指标要求，如果已经达到指标要求，可以进行版图的仿真。

版图的仿真是采用矩量法直接对电磁场进行计算，其结果比在原理图中仿真要准确，但是它的计算比较复杂，需要较长的时间。

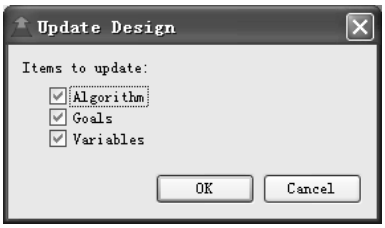


图 9-18　更新设计对话框

（7）单击图 9-16 中的Update Design...按钮，弹出更新设计对话框，如图 9-18 所示，单击OK按钮，更新设计。

9.3.3　版图仿真

（1）由原理图生成版图，先要把原理图中用于 S 参数仿真的两个“Term”及“接地”去掉，不让它们出现在生成的原理图中。去掉的方法与前面关掉优化控件的相同，使用按钮，把这些元件打上红叉，如图 9-19 所示。

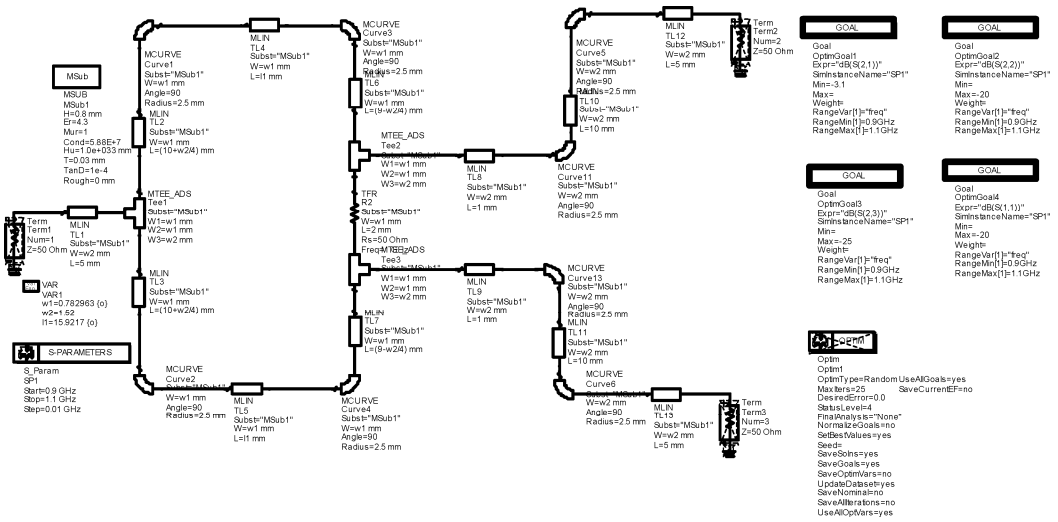


图 9-19　生成版图前的原理图

（2）单击菜单栏【Layout】→【Generate/Update Layout】，弹出设置窗口，如图 9-20 所示。直接单击OK按钮，出现另一个窗口，如图 9-21 所示。再单击OK按钮，完成版图生成，如图 9-22 所示。

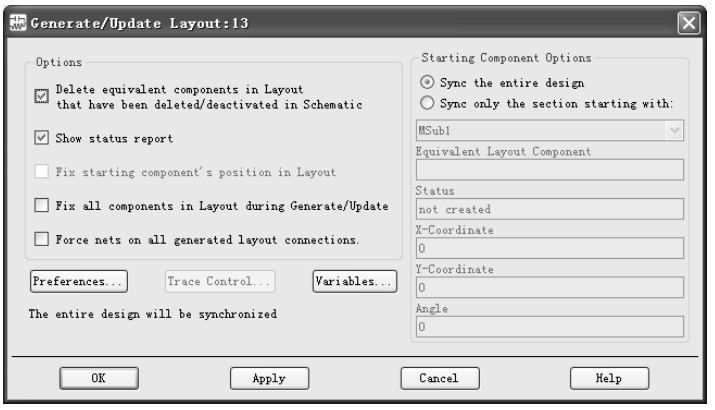


图 9-20　Layout 层设置窗口

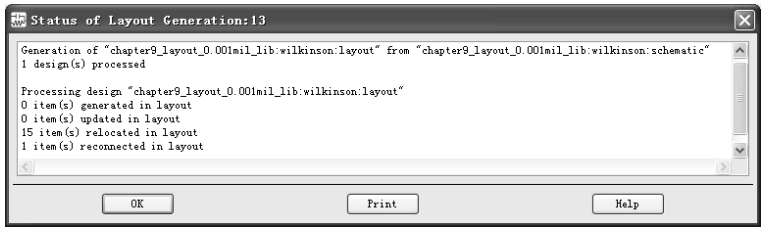


图 9-21　Layout 层状态窗口

（3）版图生成后，设置微带电路基板的基本参数。单击版图窗口菜单栏【EM】→【Substrate…】，从原理图中获得参数及修改这些参数，如图 9-23 所示。

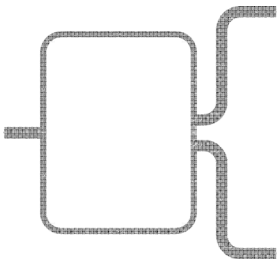


图 9-22　Wilkinson 功分器版图

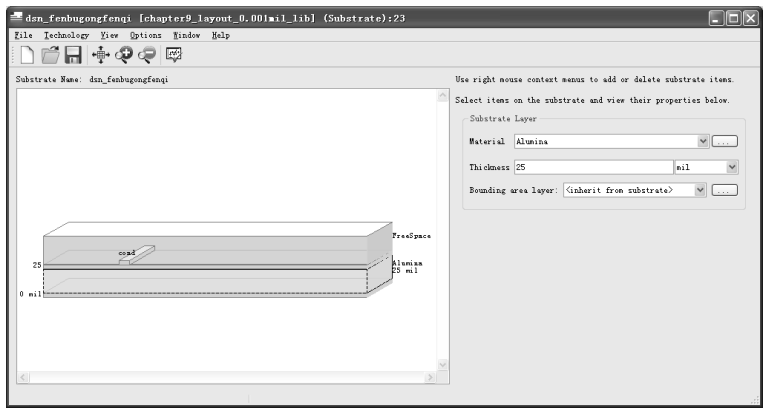


图 9-23　微带介质参数设置

（4）为了进行 S 参数仿真，在功分器两侧添加两个端口。单击工具栏上的 Port 按钮，弹出 port 设置窗口，单击 OK 按钮，关闭该窗口，在功分器三个端点加上 port。

（5）单击【EM】→【Simulation Setup…】弹出仿真设置窗口，如图 9-24 所示。单击 Show 3D View 按钮，可以查看功分器的 3D 版图，如图 9-25 所示。

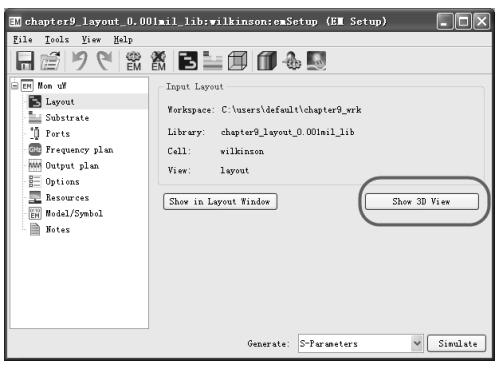


图 9-24　版图仿真设置窗口

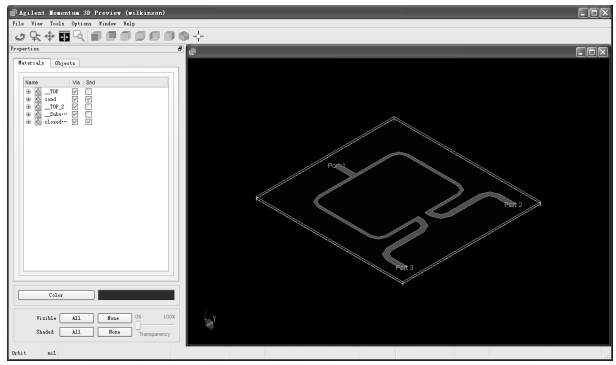


图 9-25　功分器的 3D 版图预览

（6）在仿真设置窗口左侧的“Frequency plan”中，类型选择“Adaptive”，起止频率设置与原理图相同，采样点数限制取 10（因为仿真很慢，所以点数不要取得太多）。然后单击“Update”按钮，将设置填入左侧列表中，单击 Simulate 按钮开始仿真，如图 9-26 所示。仿

真过程中会出现状态窗口显示仿真进程，如图 9-27 所示。

（7）仿真运算要进行数分钟，仿真结束后将出现数据显示窗口，观察 S 参数曲线，性能有不同程度的恶化。版图仿真曲线如图 9-28 所示。

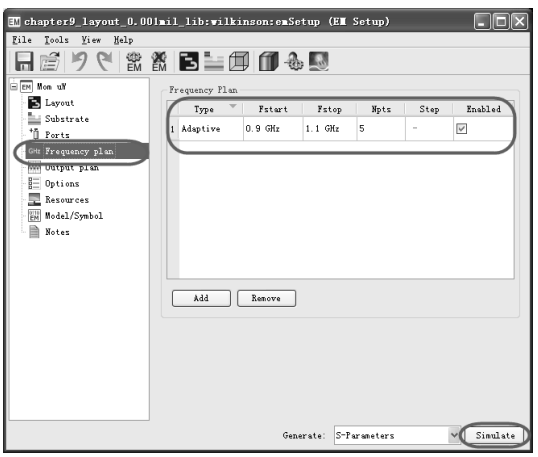


图 9-26　版图仿真参数设置

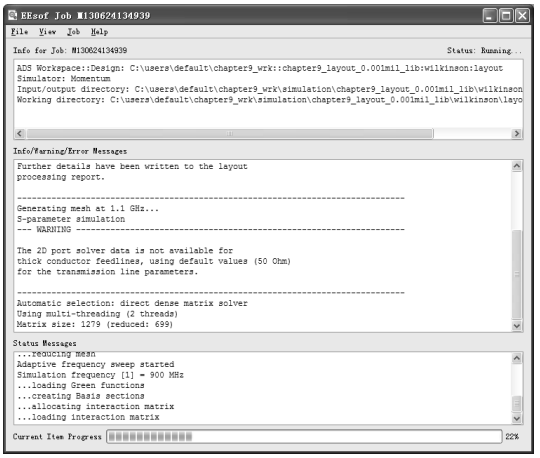


图 9-27　版图仿真状态窗口

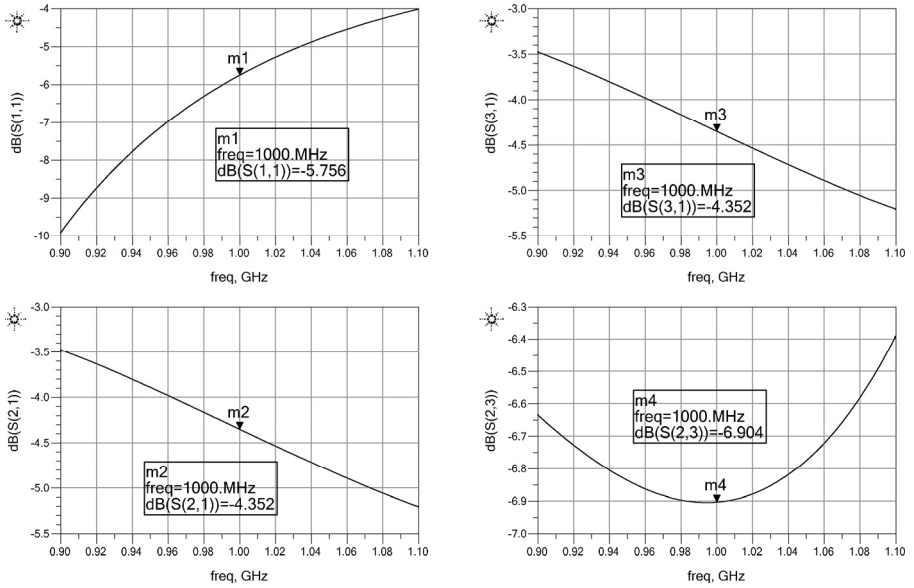


图 9-28　版图仿真曲线

9.4　思考题

（1）如何测试Wilkinson功分器的性能指标？当这种类型的功分器作为功率合成器使用时，如何测试各项指标？

（2）设计集总参数功分器过程如果技术指标难以达到，如何修改电路拓扑结构？另外还有哪些电路拓扑形式可以采用？

（3）查阅相关资料，利用集总参数模型，设计电阻式功分器（技术指标自行设定）。

第 10 章　微波滤波器的设计与仿真

在射频/微波系统中需要把信号频谱进行恰当的分离，完成这一功能的组件就是滤波器。虽然滤波器的基本原理很经典，但滤波器的结构、功能日新月异，随着材料、工艺和要求的发展，滤波器永远是射频/微波领域内活跃的组件之一。

本章应用 ADS2012 完成集总参数滤波器和分布参数（平行耦合微带线）滤波器设计，体现 ADS2012 电路图和版图设计仿真的特点及优势。

10.1　滤波器的基本原理

滤波器的基础是谐振电路，只要能构成谐振的电路组合就可实现滤波器。滤波器有四种基本原型，即低通、带通、带阻和高通。实现滤波器就是实现相应的谐振系统。电感、电容形成的滤波器称作集总参数滤波器，各种射频/微波传输线形成的谐振器称作分布参数滤波器。理论上滤波器是无耗组件。

考虑图 10-1 所示的双端口网络，设从一个端口输入具有均匀功率谱的信号，信号通过网络后，在另一端的负载上吸收的功率谱不再是均匀的，也就是说，网络具有频率选择性，这便是一个滤波器。

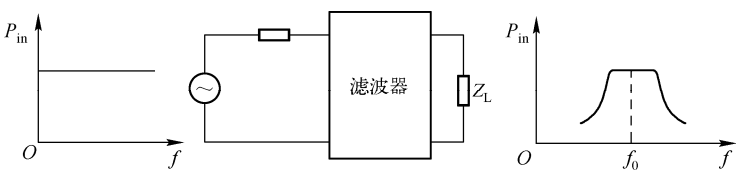


图 10-1　滤波器特性示意图

通常用工作衰减描述滤波器的衰减特性，即

$$L_A = 10\lg\frac{P_{in}}{P_L} \quad \text{dB} \tag{10-1}$$

式中，P_{in} 和 P_L 分别为输出端接匹配负载时的滤波器输入功率和负载吸收功率。式（10-1）仅表示某个频率的衰减。随着频率的不同，其数值不同。由衰减特性区分滤波器的低通、高通、带通和带阻四种原型。

为了描述衰减特性与频率的相关性，通常用数学多项式来逼近滤波器特性。最平坦型用巴特沃斯（Butterworth）多项式，等波纹型用切比雪夫（Tchebeshev）多项式，陡峭型用椭圆函数（Elliptic），等延时用高斯（Gaussian）多项式。等波纹型切比雪夫型滤波器设计比较简单，应用比较广泛，该滤波器为本章设计及仿真的重点。

1．主要技术指标

滤波器的指标形象地描述了滤波器的频率响应特性。

【3dB 带宽】由通带最小插入损耗点（通带传输特性的最高点）向下移 3dB 时所测的通带宽度。

【插入损耗】由于滤波器的介入在系统内引入的损耗。滤波器通带内的最大损耗包括构成滤波器的所有组件的电阻性损耗（如电感、电容、导体、介质的不理想）和滤波器的回波损耗（两端电压驻波比不为 1）。插入损耗限定了工作频率，也限定了使用场合的两端阻抗。

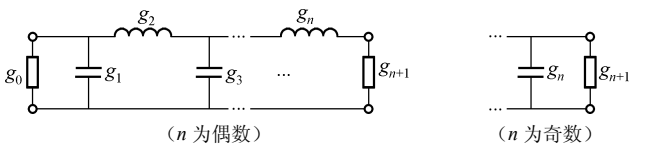
【带内纹波】插入损耗的波动范围。带内纹波越小越好，否则，会增加通过滤波器的不同频率信号的功率起伏。

【带外抑制】规定滤波器在什么频率上会阻断信号，是滤波器特性的矩形度的一种描述方式。也可用带外滚降来描述，就是规定滤波器通带外每频率下降的分贝数。滤波器的寄生通带损耗越大越好，也就是谐振电路的二次、三次等高次谐振峰越低越好。

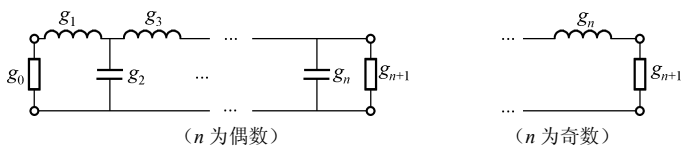
【承受功率】在大功率发射机末端使用的滤波器要按大功率设计，组件体积要大，否则会击穿打火，发射功率急剧下降。

2．切比雪夫滤波器低通原型

已知滤波器带边衰减与波纹指标为 L_{Ar}、归一化频率 Ω_c=1、截止衰减为 L_{As} 和归一化截止频率为 Ω_s，电路结构如图 10-2 所示。



（a）电容电感型



（b）电感电容型

图 10-2　切比雪夫电路结构

元件级数 n 由式（10-2）给出，元件值 g_i 由表 10-1 给出。

$$n \geqslant \frac{\cosh^{-1}\sqrt{\dfrac{10^{0.1L_{As}}-1}{10^{0.1L_{Ar}}-1}}}{\cosh^{-1}\Omega_s} \tag{10-2}$$

表 10-1　切比雪夫元件值

L_{Ar}=0.01dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.096 0	1.0								
2	0.448 9	0.407 8	1.100 8							

续表

L_{Ar}=0.01dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
3	0.629 2	0.970 3	0.629 2	1.0						
4	0.712 9	1.200 4	1.321 3	0.647 6	1.100 8					
5	0.756 3	1.304 9	1.577 3	1.304 9	0.756 3	1.0				
6	0.781 4	1.360 0	1.689 7	1.535 0	1.497 0	0.709 8	1.100 8			
7	0.797 0	1.392 4	1.748 1	1.633 1	1.748 1	1.392 4	0.797 0	1.0		
8	0.807 3	1.413 1	1.782 5	1.683 3	1.852 9	1.619 3	1.555 5	0.733 4	1.100 8	
9	0.814 5	1.427 1	1.804 4	1.712 5	1.905 8	1.712 5	1.804 4	1.427 1	0.814 5	1.0
L_{Ar}=0.1dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.305 2	1.0								
2	0.843 1	0.622 0	1.355 4							
3	1.031 6	1.147 4	1.031 6	1.0						
4	1.108 8	1.306 2	1.770 4	0.818 1	1.355 4					
5	1.146 8	1.371 2	1.975 0	1.371 2	1.146 8	1.0				
6	1.168 1	1.404 0	2.056 2	1.517 1	1.902 9	0.861 8	1.335 4			
7	1.181 2	1.422 8	2.096 7	1.573 4	2.096 7	1.422 8	1.181 2	1.0		
8	1.189 8	1.434 6	2.119 9	1.601 0	2.170 0	1.564 1	1.944 5	0.877 8	1.355 4	
9	1.195 7	1.442 6	2.134 6	1.616 7	2.205 4	1.616 7	2.134 6	1.442 6	1.195 7	1.0
L_{Ar}=3dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	1.995 3	1.0								
2	3.101 3	0.533 9	5.809 5							
3	3.348 7	0.711 7	3.348 7	1.0						
4	3.438 9	0.748 3	4.347 1	0.592 0	5.809 5					
5	3.481 7	0.761 8	4.538 1	0.761 8	3.481 7	1.0				
6	3.504 5	0.786 5	4.606 1	0.792 9	4.464 1	0.603 3	5.809 5			
7	3.518 2	0.772 3	4.638 6	0.803 9	4.638 6	0.772 3	3.518 2	1.0		
8	3.527 7	0.774 5	4.657 5	0.808 9	4.699 0	0.801 8	4.499 0	0.607 3	5.809 5	
9	3.534 0	0.776 0	4.669 2	0.811 8	4.727 2	0.811 8	4.669 2	0.776 0	3.534 0	1.0

🕮 其中 g_0 为了计算方便，进行了归一化处理，即 g_0=1。

切比雪夫低通原型滤波器的设计，就是根据技术指标计算各参数值，按照基本电路结构进行设计。

3．滤波器的频率变换

由低通原型滤波器经过频率变换，可得到低通、高通、带通和带阻四种实用滤波器。设阻抗因子为

$$\gamma_0=\begin{cases}\dfrac{Z_0}{g_0} & g_0\text{为电阻}\\ \dfrac{g_0}{Y_0} & g_0\text{为电导}\end{cases} \tag{10-3}$$

【低通变换】低通原型向低通滤波器的变换关系如图 10-3 所示。

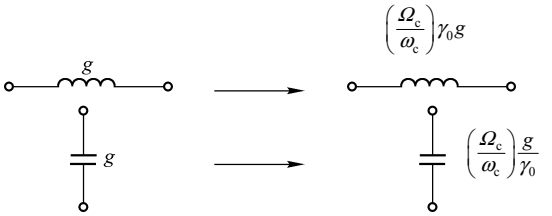


图 10-3　低通原型向低通滤波器的变换关系

【高通变换】低通原型向高通滤波器的变换关系如图 10-4 所示。

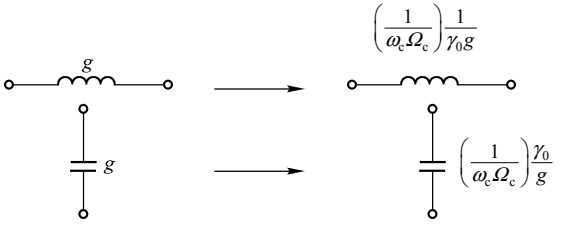


图 10-4　低通原型向高通滤波器的变换关系

【带通变换】低通原型向带通滤波器的变换关系如图 10-5 所示。

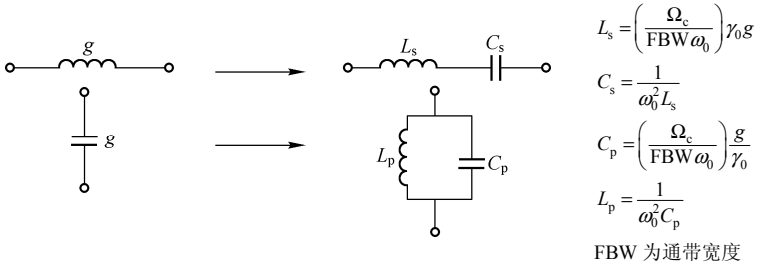


图 10-5　低通原型向带通滤波器的变换关系

【带阻变换】低通原型向带阻滤波器的变换关系如图 10-6 所示。

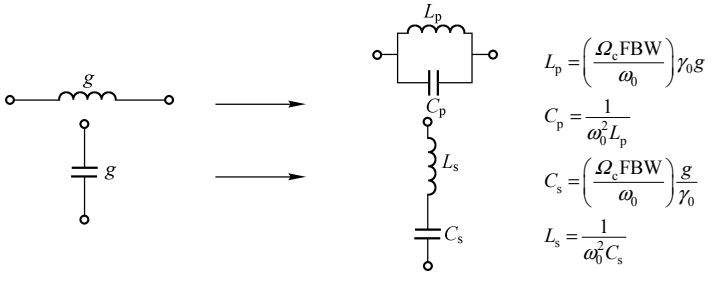


图 10-6　低通原型向带阻滤波器的变换关系

10.2　利用传统法设计集总参数滤波器

电感、电容形成的滤波器称作集总参数滤波器。本节利用 10.1 节参数计算的传统法，结合 ADS2012 设计切比雪夫低通和带通滤波器。

10.2.1　低通滤波器设计及仿真

设计 L–C 切比雪夫型低通滤波器，截止频率为 75MHz，衰减为 3dB，波纹为 1dB，频率大于 100MHz，衰减大于 20dB，Z_0=50Ω。

1．确定指标

特性阻抗 Z_0=50Ω，截止频率 f_c=75MHz，阻带边频 f_s=100MHz，通带最大衰减 L_{As}=20dB。

2．计算元件级数

将上述数值代入式（10–2），元件级数 n=5。

3．确定元件值

（1）查表求原型元件值 g_i，如表 10–2 所示。

表 10–2　原型元件值

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
2.207 2	1.127 9	3.102 5	1.127 9	2.207 2

（2）计算变换后元件值，将这些值取整，如表 10–3 所示。

表 10–3　实际元件值

C_1	L_2	C_3	L_4	C_5
93.658pF	119.67nH	131.65pF	119.67nH	93.658pF
94pF	120nH	132pF	120nH	94pF

4．利用 ADS 仿真

【创建新项目】新建项目空间，命名为 chapter10_wrk，其他选项默认。新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 lpf1。

【电路设计】在“Tlines-Microstrip”类中，选择控件，并双击编辑其中的属性，如图 10–7 所示。在“Lumped-Components”类中，分别选择、控件，在“Simulation-S_Param”类中，分别选择、控件，单击接地图标，放置两个地，双击，修改属性，如图 10–8 所示，要求仿真频率为 0～100MHz，扫描步长为 1.0MHz，低通滤波器仿真电路原理图如图 10–9 所示。

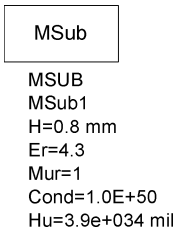


图 10-7　基板设置

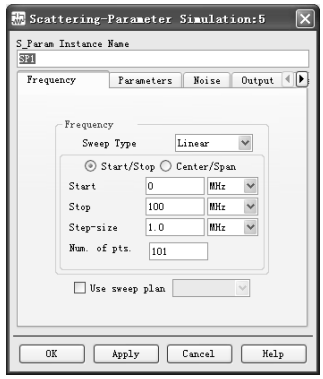


图 10-8　S 参数仿真器设置

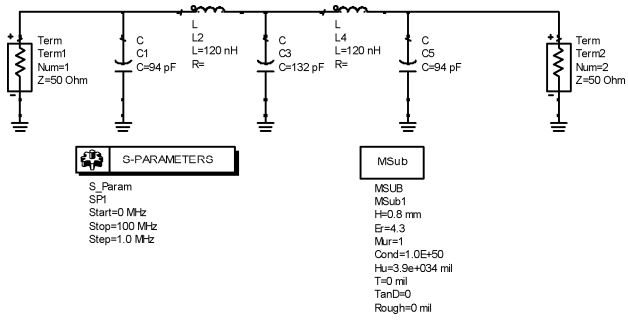


图 10-9　低通滤波器仿真电路原理图

【仿真结果输出】单击工具栏按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)，即 S11 参数，单击 Add 按钮弹出单位设置（这里选择 dB）窗口，如图 10-10 所示。单击两次 OK 按钮后，窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线，仿真曲线如图 10-11 所示。用同样的方法依次加入 S22、S21、S12 参数曲线。由于该滤波器是对称结构，S11 与 S22，以及 S21 与 S12 曲线相同，如图 10-11 所示。

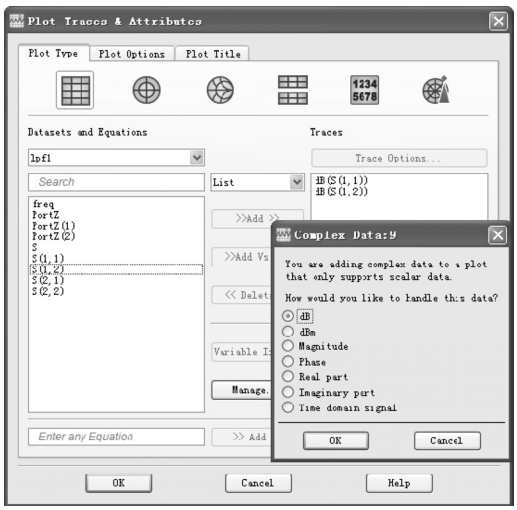


图 10-10　曲线输出设置

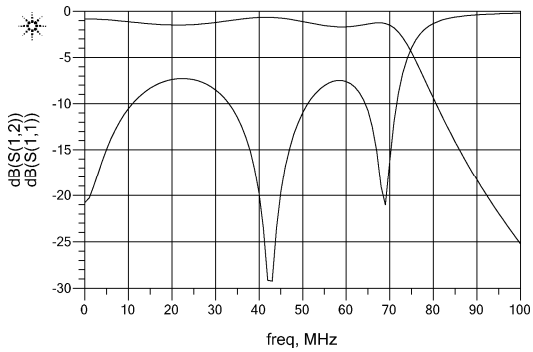


图 10-11　低通滤波器仿真曲线

10.2.2　带通滤波器设计及仿真

设计 L–C 切比雪夫带通滤波器，中心频率为 75MHz，3dB 带宽为 10MHz，波纹为 1dB，工作频带外 75±15MHz 的衰减大于 30dB，Z_0=50Ω。

1．确定指标

特性阻抗 Z_0=50Ω；
上通带边频 f_1=75+5=80MHz；
下通带边频 f_2=75−5=70MHz；
上阻带边频 f_{XU}=75+15=90MHz；
下阻带边频 f_{XL}=75−15=60MHz；
通带内最大衰减 L_{Ar}=3dB，阻带最小衰减 L_{As}=30dB。

2．计算相关参数

$$f_0=\sqrt{f_1\cdot f_2}=74.83\text{MHz}$$

$$\text{FBW}=f_2-f_1=10\text{MHz}$$

$$\Omega_{s1}=\left|\left(\frac{f_0^2}{f_{XL}}-f_{XL}\right)\cdot\frac{1}{\text{FBW}}\right|=3.333$$

$$\Omega_{s2}=\left|\left(f_{XU}-\frac{f_0^2}{f_{XU}}\right)\cdot\frac{1}{\text{FBW}}\right|=2.778$$

$$\Omega_s=\text{MIN}(\Omega_{s1},\Omega_{s2})=2.778$$

3．计算元件级数

将上述数值代入式（10–2），元件级数 n=3。

4．确定元件值

计算原型元件值 g_i，如表 10–4 所示。

表 10–4　带通滤波器元件值

低通原型值	g_1	1.432 8	g_2	1.593 7	g_3	1.432 9
低通原型元件值	C_{p1}	456pF	L_s	1268nH	C_{p3}	456pF
带通变换元件值	L_{p1}	10nF	C_s	3.6pF	L_{p3}	10nH

5．利用 ADS 仿真

【创建新项目】在 chapter10_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 lpf2。

【电路设计】在“Tlines-Microstrip”类中，选择控件，并双击编辑属性，如图 10–12 所示。在“Lumped-Components”类中，分别选择、控件，在“Simulation-S_Param”类中，分别选择、控件。单击图标，放置两个地，双击，修改属性，要求仿真

频率为 50～100MHz，扫描步长设为 2.0MHz，带通滤波器仿真电路图如图 10-12 所示。

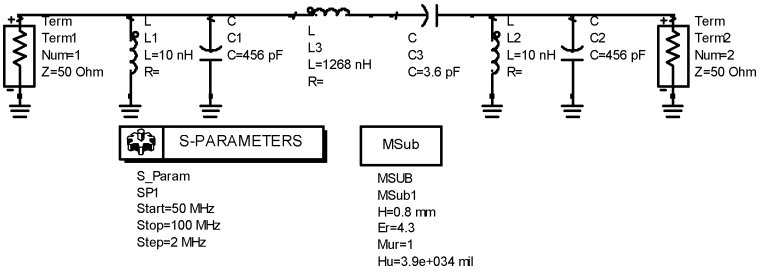


图 10-12　集总参数带通滤波器仿真电路图

【仿真结果输出】单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)，即 S11 参数，单击 Add 按钮弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次 OK 按钮后，图形窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线。用同样的方法依次加入 S22、S21、S12 参数曲线，由于该滤波器为对称结构，S11 与 S22，以及 S21 与 S12 参数曲线相同。得到仿真曲线如图 10-13 所示。

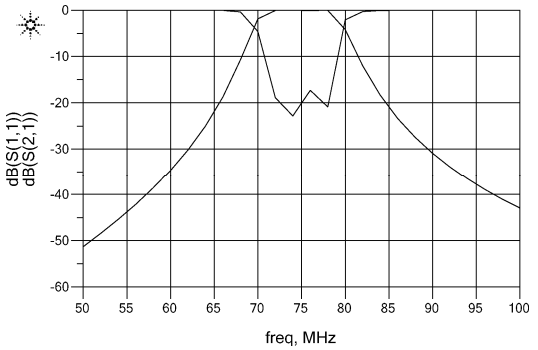


图 10-13　带通滤波器仿真曲线

10.3　利用 ADS 工具设计集总参数滤波器

ADS2012 自带滤波器设计工具，利用这个滤波器设计工具可以方便地设计出满足用户要求的射频滤波器，本节通过案例对滤波器设计工具的使用方法进行详细介绍。

设计一个低通滤波器，通带带宽为 200MHz，阻带带宽为 1.2GHz，带内纹波系数小于 0.1dB，输入阻抗为 50Ω。

10.3.1　滤波器电路的生成

（1）创建一个项目，在 chapter10_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 lpf3。

（2）确认该原理图是当前屏幕唯一打开的原理图，如果还有其他原理图打开则要先将它们关掉。

（3）选择菜单栏中的【Design Guide】→【Filter】命令，系统将弹出滤波器设计主窗口，如图 10-14 所示。

（4）在窗口中选择“Filter Control Window…”并单击 OK 按钮，系统将弹出“Filter DesignGuide”窗口，进行滤波器参数设计，如图 10-15 所示。

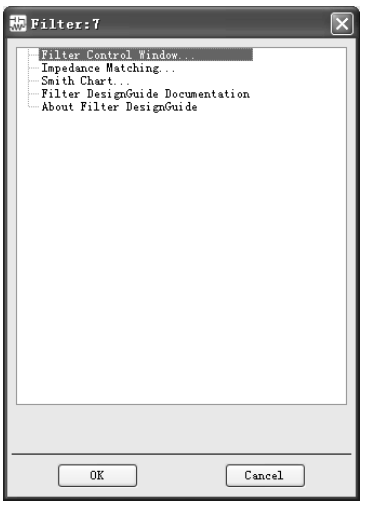


图 10-14　滤波器设计主窗口

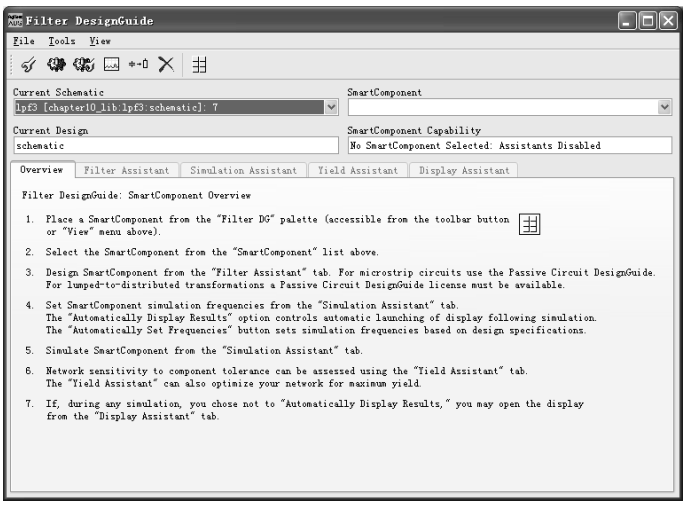


图 10-15　滤波器参数设计

（5）在“Filter DesignGuide”窗口中单击工具栏中的“Component Palette-All”按钮，在刚建立的原理图中将出现新的组件面板“Filter DG-All”，如图 10-16 所示。这个组件面板中列出了滤波器设计向导中的各种滤波器模型。

（6）在“Filter DG-All”组件面板中选择双端口低通滤波器（low-pass filter DT）控件，这时系统将弹出提示窗口，如图 10-17 所示。

（7）单击窗口中的 OK 按钮，将选择的双端口低通滤波器插入到原理图中，按下“Esc”键结束命令。插入的双端口低通滤波器模型如图 10-18 所示。

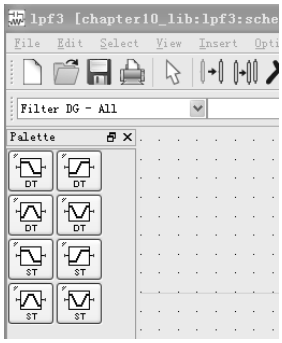


图 10-16　滤波器组件面板

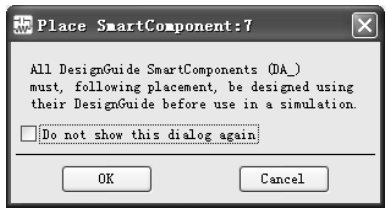


图 10-17　提示窗口

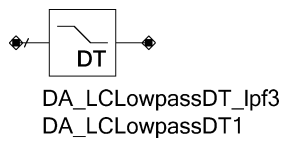


图 10-18　低通滤波器模型

（8）重新回到滤波器设计向导窗口中，然后选择“Filter Assistant”选项卡，可以看到滤波器设计向导窗口中出现了一个带有滤波器参数设置和滤波器幅频曲线的参数设置窗口，如图 10-19 所示。在“SmartComponent”项中已经出现了刚刚插入原理图中的低通滤波器 DA_LCLowpassDT1。

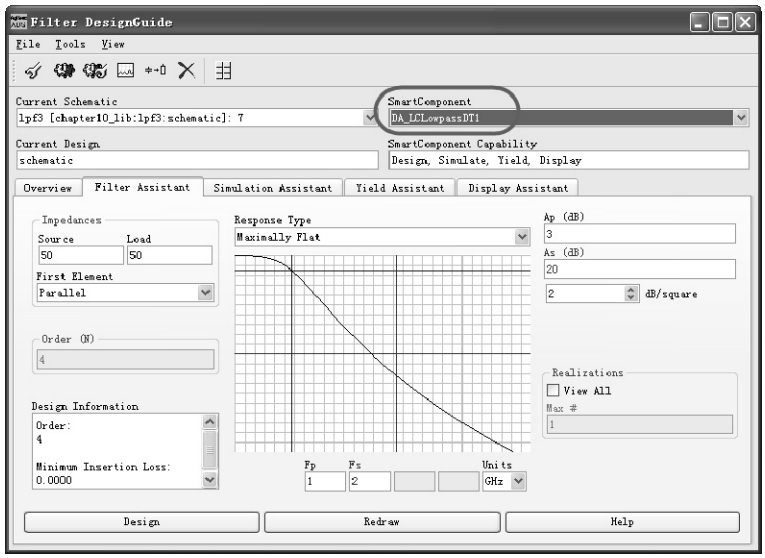


图 10-19　滤波器幅频参数设置窗口

（9）在滤波器设计向导窗口中，输入滤波器的三个详细特征参数：

☺ Ap（dB）=3　表示滤波器的纹波系数为 3;

☺ Fp=1GHz　表示滤波器的通带带宽为 1GHz;

☺ Fs=2GHz　表示滤波器的阻带带宽为 2GHz。

（10）改变“Response Type”项内容，单击图 10-19 中的 Redraw 按钮，可以看到滤波器的响应曲线发生了变化，如图 10-20 所示。

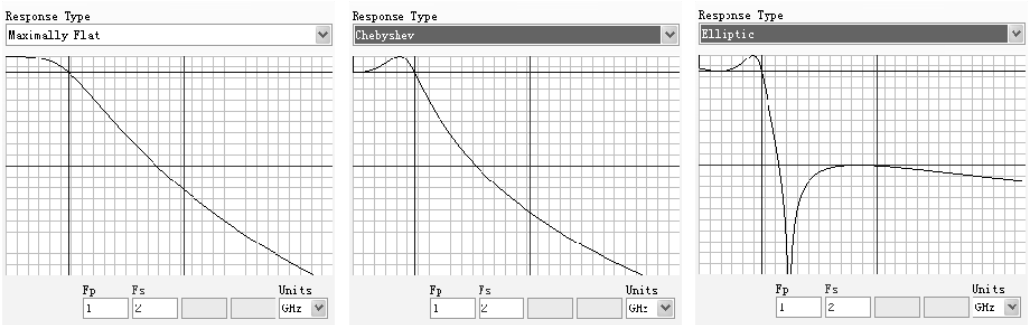


图 10-20　几种滤波器响应

（11）把“Response Type”中的选项重新选择为“Maximally Flat”，并单击 Design 按钮开始滤波器的设计。系统将自动设计一个集总参数的滤波器。

（12）这时，返回原理图中，可以发现组件已经具有刚刚设置的滤波器特性，双击滤波器组件，可以观察滤波器参数，如图 10-21 所示。

（13）在图 10-21 中选择“Display parameter on schematic”项将滤波器的所有参数都显示出来，此时原理图设计窗口中的滤波器组件如图 10-22 所示。

（14）查看系统为这个滤波器设计的具体电路，可以首先选择滤波器组件，然后在工具栏中单击按钮，得到滤波器组件的子电路，如图 10-23 所示。由图可见，这个滤波器是由两

个电容和一个电感组成的 Π 形结构，还可以观察组成滤波器的各个集总参数元件的值。

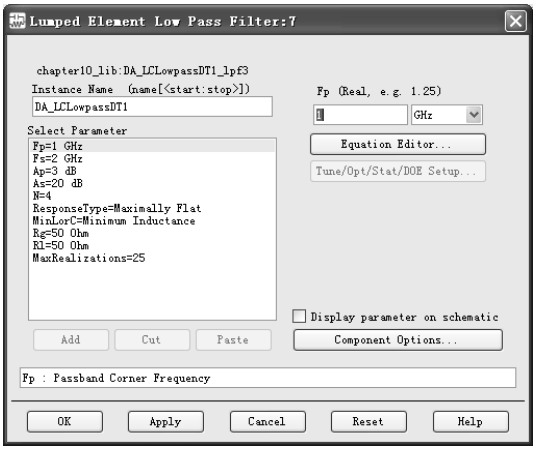


图 10-21　滤波器参数设置

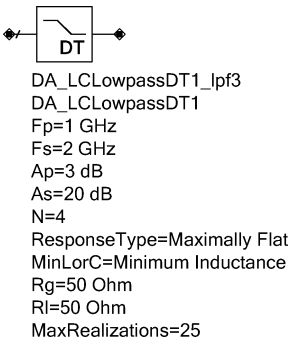


图 10-22　滤波器组件

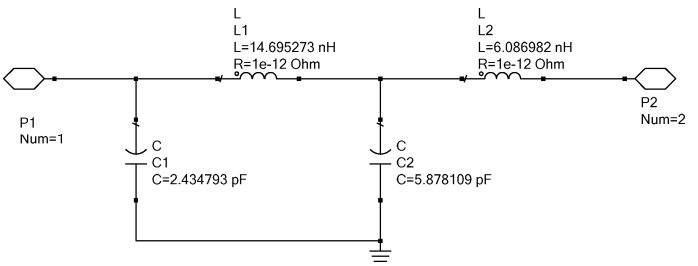


图 10-23　滤波器组件的子电路

这样，利用 ADS 自带的滤波器设计向导完成了规定参数的滤波器的设计，下面验证滤波器的参数是否能达到指标要求。

10.3.2　滤波器的仿真

（1）选择“Simulation-S_Param”类，把仿真器和“Term”放置到原理图中，单击图标，放置两个地，双击图标，修改属性，要求扫描频率为 0～1.3GHz，步长设为 10MHz，滤波器仿真电路如图 10-24 所示。

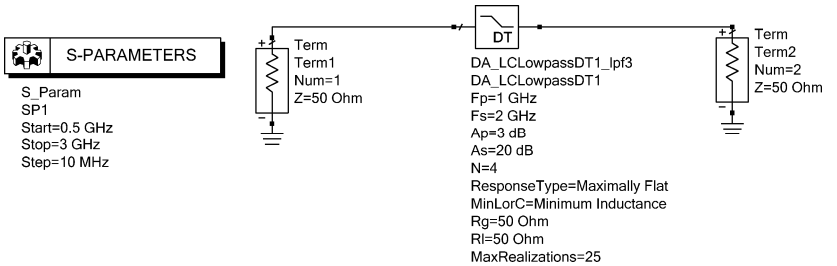


图 10-24　滤波器仿真电路

（2）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。

（3）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(2,1)即 S21 参数，单击 Add 按钮，弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次

OK 按钮，窗口中显示出 S21 参数随频率变化的曲线，如图 10-25 所示。

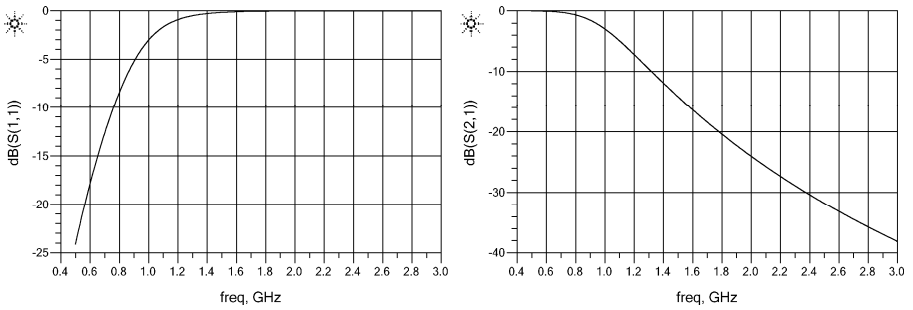


图 10-25 低通滤波器仿真曲线

（4）单击菜单中的【Marker】→【New】命令，出现“Insert Marker”窗口，接着单击要添加标记的曲线，曲线上出现一个倒三角标记，单击拖动此标记，可以看到曲线上各点的数值。在 S21 曲线中添加 m3 标记，可以发现滤波器在 1.7GHz 处的 S21 参数接近阻带衰减−20.056dB，这满足了前面的设计要求，m1 在 1GHz 处的通带内损耗为−3dB，同样满足了设计要求。

（5）在矩形图中插入关于 S11 参数的曲线，并在曲线上插入标记 m2，移动标记，可以看到，滤波器在 1GHz 的频点处插入反射系数为−3.021dB，也满足了设计的指标要求，如图 10-26 所示。

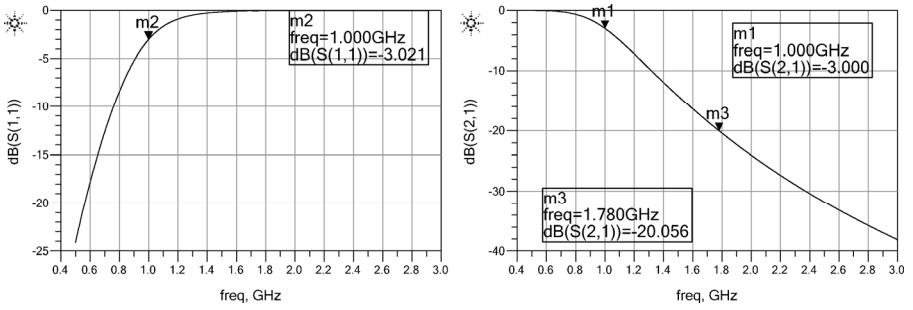


图 10-26 低通滤波器仿真曲线

（6）在数据显示窗口中插入 S12 数据曲线，可以发现 S12 数据曲线与 S21 数据曲线是相同的，这是因为这个滤波器电路相对于输入和输出端口来说是对称的，这种滤波器可以用在天线前端，作为收发公用的滤波器。

至此，利用 ADS 滤波器设计工具完成了滤波器设计，并对它的主要参数和指标进行了仿真，但是这个仿真中用到的电容和电感都是理想组件，没有考虑它的寄生参数的影响，并且当频率非常高时，由于波长与组件尺寸相差不多，使用集总参数组件设计滤波器会变得非常困难，因此人们一般用微带设计射频滤波器。

10.4 分布参数滤波器设计

分布参数滤波器就是由各种射频/微波传输线形成的谐振器。利用微波传输线构成的滤

波器有很多结构，如端耦合微带谐振滤波器、平行耦合微带线滤波器、发卡式滤波器、交指线滤波器、梳状线滤波器等。

其中平行耦合微带线滤波器如图 10-27 所示。每一段线都是一个半波长谐振器（相当于滤波器组件值），平行的间隙是耦合组件（相当于变换器），耦合间隙在谐振线边缘可以实现宽带耦合。该滤波器应用广泛，设计简单，本节结合 ADS2012 设计中心频率为 10GHz 的带通滤波器电路，并完成版图设计。

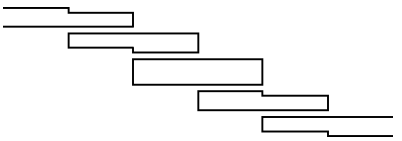


图 10-27　平行耦合微带线滤波器结构图

10.4.1　微带带通滤波器的设计

设计平行耦合微带线滤波器，通带 3.0～3.1GHz，带内衰减小于 2dB，起伏小于 1dB，2.8GHz 以下及 3.3GHz 以上衰减大于 40dB，反射系数小于−20dB。

> 本节直接讲述 ADS 设计过程，参数计算从略，请读者自行查阅相关资料。

（1）创建新项目，在 chapter10_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 lpf4。

（2）在“Tlines-Microstrip”类中，选择控件，双击编辑其中的属性；选择微带传输线控件，选择耦合线控件，按照图 10-28 所示连接电路图。

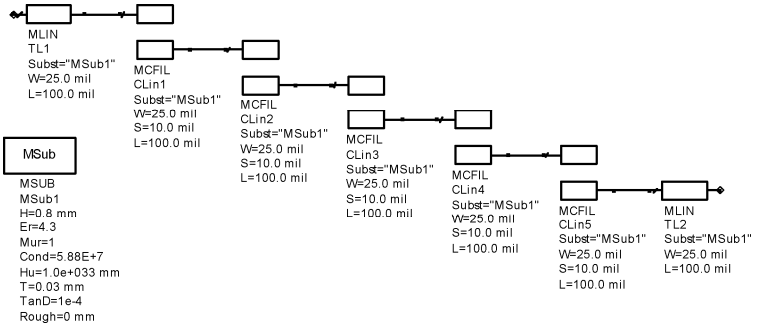


图 10-28　带通滤波器电路图

> 图 10-28 只是表示各个元件的连接方式，参数 *W*、*L*、*S* 设置都是暂时的，在后续的设计过程中要进行修改。

（3）滤波器两边是特性阻抗为 50Ω 的微带线，单击菜单栏【Tools】→【LineCalc】→【Start Linecalc】，出现微带线计算工具，按照第 9 章介绍的方法计算 Z_0=50Ω 微带线宽度 W=1.52mm。

（4）双击两边的引出线 TL1、TL2，将其宽度 *W* 与长度 *L* 分别设为 1.52 mm 和 2.5 mm，其中线长 *L* 只是暂定，制作版图时还会修改。

（5）平行耦合线滤波器的结构是对称的，所以五个耦合线节中，第 1、5 及 2、4 节微带线长 *L*、宽 *W* 和缝隙 *S* 的尺寸相同。耦合线的这些参数是滤波器设计和优化的主要参数，因此要用变量代替，便于后面修改和优化。

（6）双击每个耦合线设置参数，*W*、*S*、*L* 分别设为相应的变量，单位为 mm，其中的

W_1 与 W_2 参数代表该器件左右相邻两侧的微带器件的线宽，它们用来确定器件间的位置关系。在设置 W_1、W_2 时，为了让它们显示在原理图上，应选中“Display parameter on schematic”选项，如图 10-29 所示。

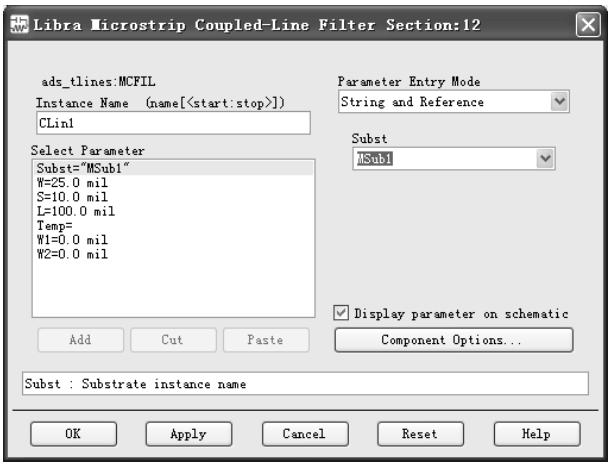


图 10-29　耦合线参数设置

（7）所有元件的参数都设置完成，如图 10-30 所示。

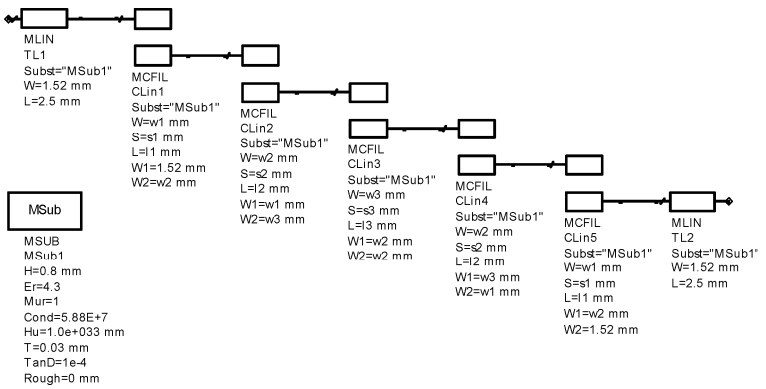


图 10-30　设置各元件参数后的原理图

（8）单击工具栏 VAR 图标，在原理图中放置变量 VAR 控件，双击该图标弹出设置窗口，依次添加各参数，如图 10-31 所示。在“Name”栏中填变量名称，“Variable Value”栏中填变数的初值，单击“Add”按钮添加变量。单击 Tune/Opt/Stat/DOE Setup... 按钮，弹出菜单，如图 10-31 所示，选择“Optimization”选项卡，设置变量的取值范围。“Enabled/Disabled”表示该变量是否能被优化。

> 耦合线的长 L 约为 1/4 波长（根据中心频率用微带线计算工具算出），微带线和缝隙的宽度最窄只能取 0.2 mm，最好取 0.5 mm 以上。

（9）在“Simulation-S_Param”类中，把仿真器 和“Term” 放在原理图适当位置，单击 图标，放置两个地，双击 S-PARAMETERS 图标，修改属性，要求扫描频率为 2.7～3.4GHz，扫描步长为 10MHz，滤波器仿真电路如图 10-32 所示。

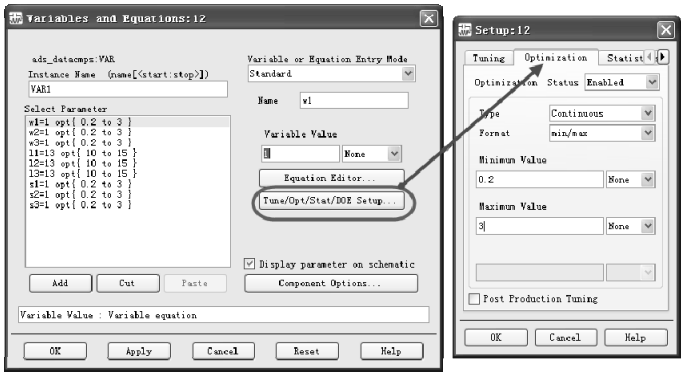


图 10–31　变量设置

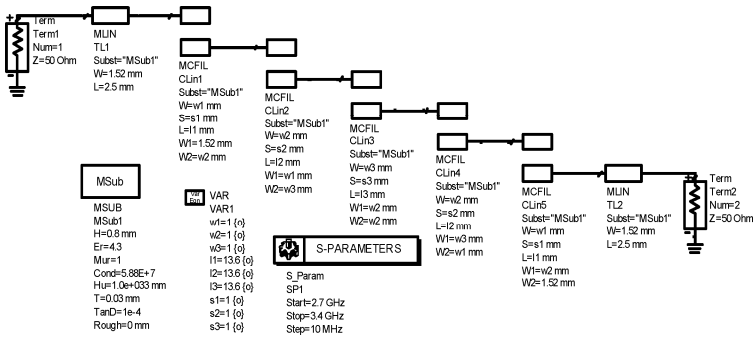


图 10–32　滤波器仿真电路

10.4.2　电路优化及仿真

（1）优化参量设置：在“Optim/Stat/Yield/DOE”类中，选择 控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 10–33 所示。选择 控件，放置在原理图中，双击该控件设置其参数，如图 10–34 所示。共设四个优化目标控件。优化目标设置后，滤波器电路如图 10–35 所示。保存文档。

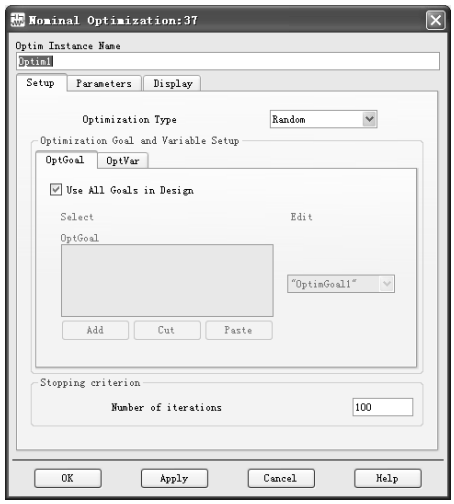


图 10–33　优化参数设置



图 10-34　优化目标设置

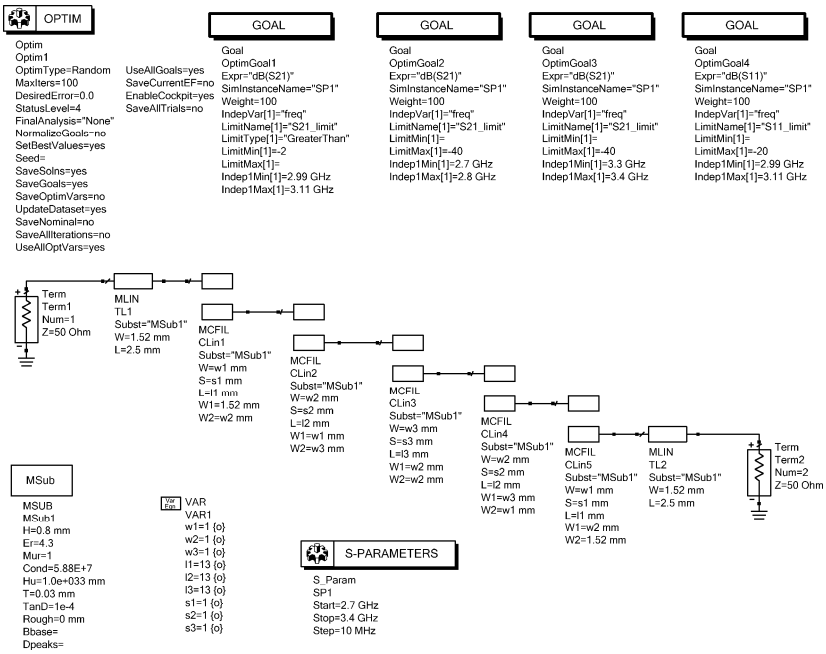


图 10-35　优化设置后的滤波器电路

（2）电路仿真优化：单击工具栏中的优化按钮，开始仿真优化，弹出优化对话框，如图 10-36 所示。

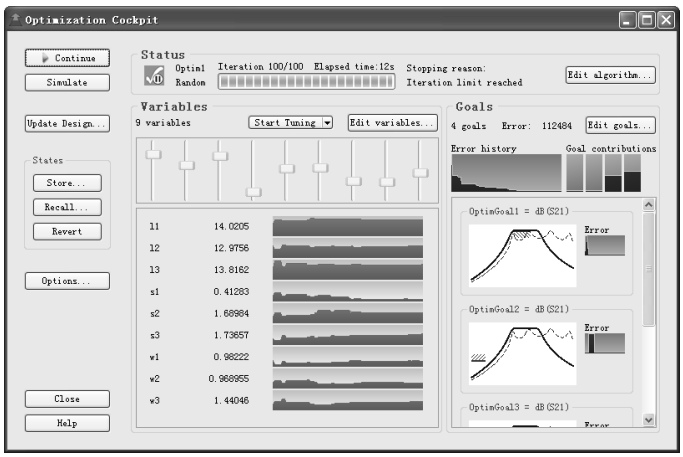


图 10-36　优化对话框

（3）仿真曲线输出：单击图 10-36 中的 Simulate 按钮，单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)，即 S11 参数，单击 >>Add>> 按钮弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次 OK 按钮后，窗口中显示出 S11 参数随频率变化的曲线。用同样的方法依次加入 S22、S21、S12 参数曲线，由于滤波器的对称结构，S11 与 S22，以及 S21 与 S12 曲线相同。单击菜单中的【Marker】→【New】，添加标记，如图 10-37 所示。

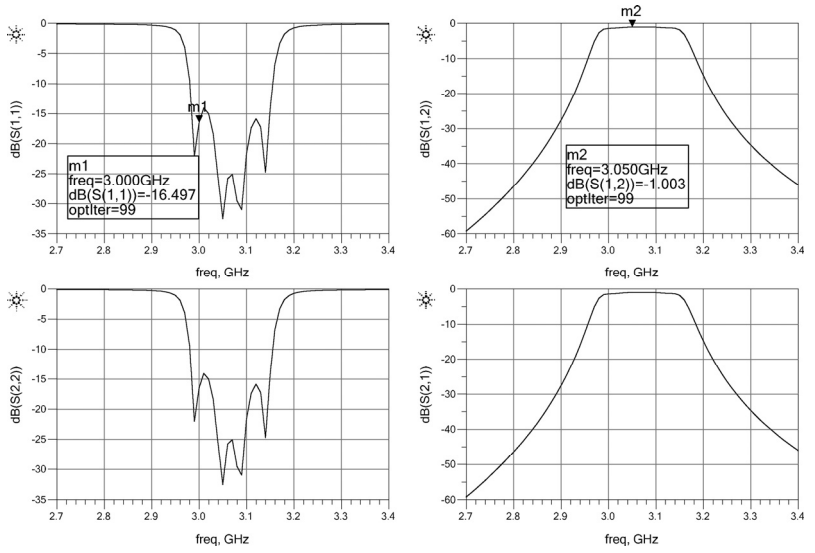


图 10-37　仿真曲线

（4）单击图 10-36 中的 Update Design... 按钮，弹出更新设计对话框，如图 10-38 所示。单击 OK 按钮，更新设计。

观察 S11(S22)和 S21 (S12)曲线是否满足指标要求（包括优化目标中未设定的带内起伏小于 1dB 的要求），如果已经达到指标要求，可以进行版图的仿真。在版图仿真前要看一下相邻各耦合线的微带线宽是否相差过大，如果相差过大就会造成原理图和版图仿真结果有较大的差别，这就需要改变变量初值重新进行优化。



图 10-38　更新设计对话框

10.5　思考题

（1）如果仿真中发现微带带通滤波器通带的中心频率偏高 50MHz，则应当增加还是减小耦合线的长度，才能使通带移到正确的频率？

（2）在优化仿真中加大 S 参数仿真的频率范围，微带带通滤波器的寄生通带将会出现在什么频率上？

（3）信号通过滤波器时产生的衰减可能来自哪几个方面？

（4）查阅相关资料，利用集总参数模型，设计巴特沃斯型低通滤波器（要求技术指标与切比雪夫型滤波器相同），比较两种滤波器的设计差别。

第 11 章　低噪声放大器设计与仿真

低噪声放大器的主要作用是放大天线从空中接收到的微弱信号，减少噪声干扰，以供系统解调出所需的信息数据。现在，人们对各种无线通信工具的要求也越来越高，如功率辐射要小，作用距离要远，覆盖范围要广等，这就对系统接收灵敏度提出了更高的要求，而解决的方法之一就是低噪声放大器的设计，这不仅仅对整个接收系统很重要，也是提高灵敏度的关键手段之一。

本章应用 ADS2012 完成低噪声放大器的设计与仿真，并对其参数进行优化设计，体现 ADS2012 仿真与优化的特点和优势。



11.1　低噪声放大器的基本原理

1．基本概念

放大器可分为低噪声放大器、高增益放大器、中功率放大器和大功率放大器。电路组态按工作点的位置依次分为 A 类、B 类、C 类三种。A 类放大器用于小信号、低噪声环境，通常用作接收机前端放大器或功率放大器的前级放大。B 类和 C 类放大器电源效率高，输出信号谐波成分高，需要有外部混合电路或滤波电路。由 B 类和 C 类放大器还可派生出 D 类、E 类、F 类等放大器。为了获得更大的输出功率，就要使用功率合成器，将许多功放单元组合起来。合成的效率不可能是百分之百。

随着通信技术的飞速发展，人们对各种无线通信工具的要求也越来越高，功率辐射小、作用距离远、覆盖范围大已成为各运营商乃至无线通信设备制造商的普遍追求，这就对系统的接收灵敏度提出了更高的要求，系统接收灵敏度由式（11-1）给出：

$$S = -174 + \mathrm{NF} + 10\log(\mathrm{BW}) + S/N \qquad (11\text{-}1)$$

式中，NF 为噪声系数，BW 为系统带宽，*S*/*N* 为输入信号噪声比。因此可以看出，在各种特定（带宽、解调 *S*/*N* 已定）的无线通信系统中，能有效提高灵敏度的关键因素就是降低接收机的噪声系数 NF，而决定接收机的噪声系数的关键部件就是出于接收机最前端的低噪声放大器。低噪声放大器的主要作用是放大天线从空中接收到的微弱信号，降低噪声干扰，所以低噪声放大器的设计对整个接收机来说至关重要。

2．主要技术指标

【频率范围】放大器的工作频率范围是选择器件和电路拓扑设计的前提。

【增益】它是放大器的基本指标。按照增益可确定放大器的级数和器件类型。

【噪声系数】放大器的噪声系数是输入信号的信噪比与输出信号的信噪比的比值。表示信号经过放大器后信号质量的变坏程度。级联网络中，越靠前端的元件对整个噪声系数的影

响越大。在接收前端，必须做低噪声设计。放大器的设计要远离不稳定区。噪声的好坏主要取决于器件和电路设计。

【动态范围】放大器的线性工作范围。最小输入功率为接收灵敏度，最大输入功率是引起 1 dB 压缩的功率。动态范围影响运动系统的作用距离范围。

3．低噪声放大器设计原则

在进行低噪声放大器的实际设计中，一定要注意以下几点。

【放大器中放大管的选择】在微波电路中应用的低噪声放大管的主要要求是高增益和低噪声以及足够的动态范围，目前双极型低噪声管的工作频率可以达到几千兆赫兹，噪声系数为几分贝，而砷化镓信号的场效应管的工作频率更高，并且噪声系数可在 1dB 以下。一般说选取低噪声放大器管通常可以从以下两个方面进行考虑:

- ☺ 微波低噪声管的噪声系数足够小，工作频段足够高，一般晶体管的 f_T 一般要比工作频率高 4 倍以上，而 PHEMT 场效应管的噪声系数在 2GHz 时可在 0.5dB 左右，工作频率高端可达到 6GHz。
- ☺ 微波低噪声管要有足够高的增益和足够高的动态范围，一般要求放大器工作增益大于 10dB 以上，当输入信号达到系统最大值时由放大器非线性引起的交调分量小于系统基底噪声。

【输入、输出匹配电路的设计原则】对单级晶体管放大器的噪声系数，可以转化成等噪声系数圆。圆上每一个点代表一个能产生恒定噪声系数的源发射系数。如要获得需要的噪声系数，只要在圆图上画出对应于这个噪声系数的圆，然后将源阻抗匹配到这个圆上的一个点就行了。实际设计中由于要兼顾到放大器的增益，通常不取最小噪声系数。在对放大器进行单项化设计时，对于特定的晶体管 S11、S22 是确定的，不同的源反射系数 Γ_1 和负载系数 Γ_2 可以构成恒定增益圆，设计时只需将源和负载反射系数分别匹配到相应的圆上，便能得到相应的增益。将恒定增益圆与等噪声系数圆结合起来设计，便能得到比较理想的结果。

【电路中需要注意的一些问题】一般对于低噪声放大器采用高 Q 值的电感完成偏置和匹配功能，由于电阻会产生附加的热噪声，放大器的输入端应尽量避免直接近接到偏置电阻上。用于低噪声放大器的印制板应具有损耗小、易于加工、性质稳定的特点，材料的物理和电气性能均匀（特别是介电常数和厚度）。同时对材料的表面光洁度有一定要求，通常可以采用以 FR74（介电常数在 4～5 之间）为基片的板材，如果电路要求较高可采用以氧化铝陶瓷等材料为基片的微波板衬，在 PCB 布板中则要考虑到邻近相关电路的影响，注意滤波、接地和外电路设计中要满足电磁兼容设计原则。

【低噪声放大器方便的设计手段】目前低噪声放大器的设计普遍采用 CAD 的方法进行仿真，国内较流行的有 EESOF、MWOffice 和 ADS 等软件。相对而言 Agilent 公司的 ADS 功能强大、简明直观、应用范围较广，大多数公司和科研单位的 LAN 基本上都采用 ADS 进行仿真，并且效果良好。

【同行业低噪声放大器的发展水平】随着半导体器件的发展，低噪声放大器的性能不断提高，采用 PHEMT 场效应晶体管的低噪声放大器在 800MHz 频段噪声系数可达到 0.4dB，增益约 17dB 左右，1 900MHz 频段噪声系数可达到 0.6，增益为 15dB 左右。在本章中，由于篇幅限制，仅介绍一个基于 BJT 的低噪声放大器的设计，今后读者用其他的晶体管进行设计时，基本原理和步骤完全相同。

11.2 低噪声放大器的设计

11.2.1 晶体管直流工作点扫描

（1）创建新项目，新建项目空间，命名为 chapter11_wrk，其他选项默认。新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln。

（2）选择“Sources-Time Domain”类，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性使 Vdc=VCE，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性使 Idc=IBB。

（3）选择“Probe Components”类，选择控件放置到原理图中，在工具栏单击图标，查找元件 pb_hp_AT41411_19921101 放置到原理图中。

（4）选择“Simulation-DC”类，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 11-1 所示。

（5）选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 11-2 所示。

（6）单击工具栏上的 VAR 图标，把变量控件 VAR 放置在原理图上，双击该图标设置属性，如图 11-3 所示。

（7）选择类“Simulation-S_Param”并放置仿真器，双击修改属性，如图 11-4 所示。

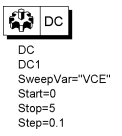


图 11-1 DC 控制器

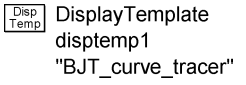


图 11-2 显示模板控件

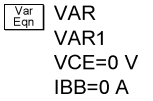


图 11-3 添加变量控件

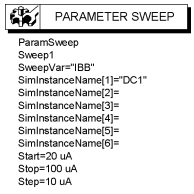


图 11-4 参数扫描控件

（8）单击接地图标设置接地，单击工具栏上的图标把各元件连接成如图 11-5 所示电路。

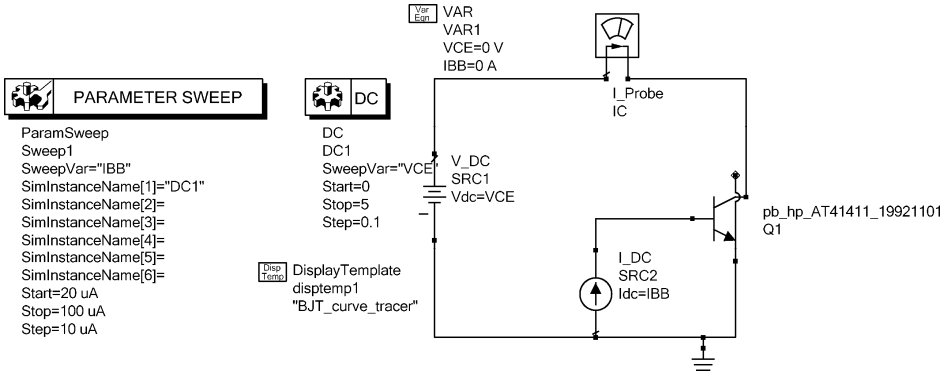


图 11-5 晶体管直流工作点电路原理图

（9）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后，结果如图 11-6 所示。

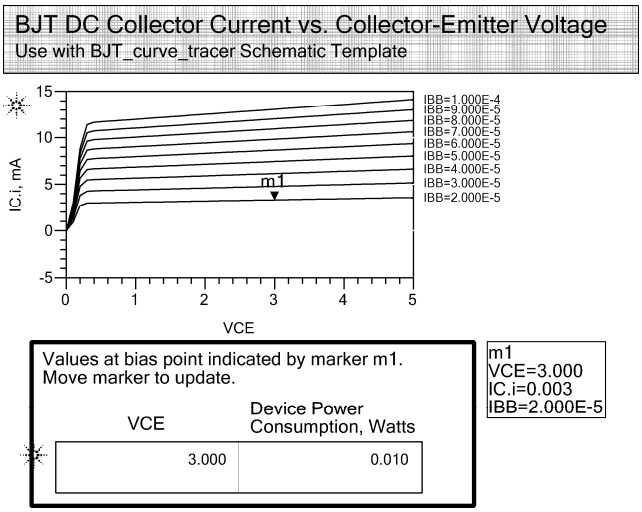


图 11-6　I-V 特性曲线扫描结果

11.2.2　晶体管 S 参数扫描

（1）创建一个新项目，在 chapter11_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln1。新建电路原理图窗口，在工具栏单击图标，查找元件 pb_mot_MMBR941_19961020 放置到原理图中。

（2）选择“Simulation-S_Param”类，选择控件放置两个到原理图中合适位置。

（3）单击接地图标设置各端口接地。

（4）选择仿真器放置到原理图中合适位置，双击修改属性，如图 11-7 所示。

（5）选择“Simulation-DC”类，选择控件放置到原理图中，双击修改属性，如图 11-8 所示。

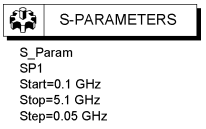


图 11-7　S 参数扫描控制器

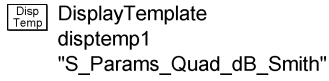


图 11-8　显示模板控件

（6）单击工具栏中的图标把各元件连接成如图 11-9 所示电路。

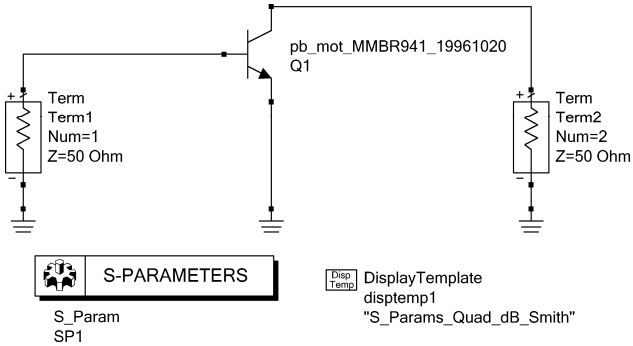


图 11-9　晶体管 S 参数扫描原理图

（7）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后，以不同形式显示输出 S 参数，如图 11-10 所示。

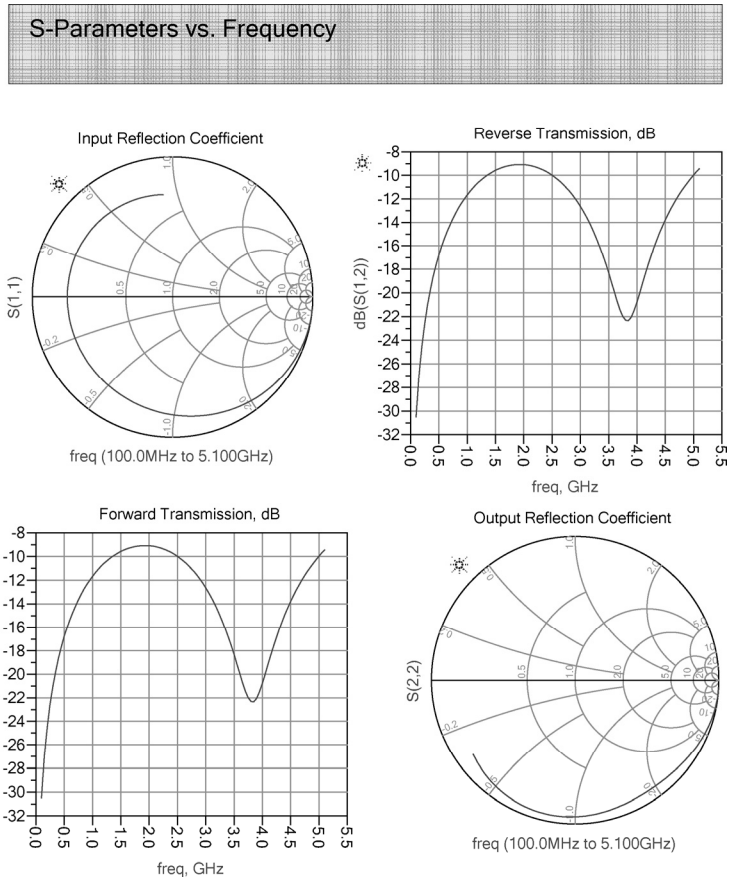


图 11-10　S 参数仿真结果

（8）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置矩形框到数据窗口中，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击 >>Add>> 按钮弹出窗口设置单位（这里选择 dB）。单击两次 OK 按钮后，S11 随频率变化的曲线如图 11-11 所示。

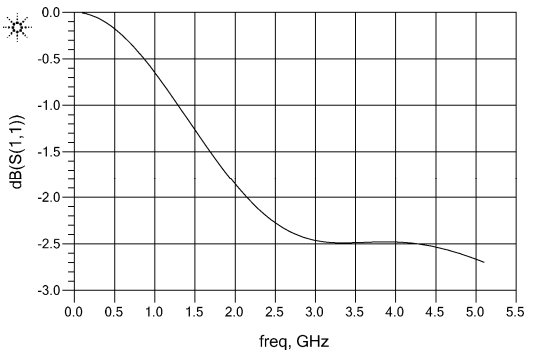


图 11-11　S11 参数随频率变化曲线

（9）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置列表窗口，并设置窗口，在窗口

左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击[>>Add Vs...>>]按钮可以对结果的输出格式进行高级控制，以 dB 的格式显示数据，如图 11-12 所示。

dB(S(1,1))	S(1,1)	freq
-0.144	0.984 / -23.955	450.0 MHz
-0.176	0.980 / -26.612	500.0 MHz
-0.212	0.976 / -29.268	550.0 MHz
-0.251	0.972 / -31.924	600.0 MHz
-0.292	0.967 / -34.578	650.0 MHz
-0.336	0.962 / -37.232	700.0 MHz
-0.383	0.957 / -39.885	750.0 MHz
-0.431	0.952 / -42.539	800.0 MHz
-0.482	0.946 / -45.192	850.0 MHz
-0.535	0.940 / -47.846	900.0 MHz
-0.590	0.934 / -50.502	950.0 MHz
-0.647	0.928 / -53.159	1.000 GHz
-0.704	0.922 / -55.818	1.050 GHz
-0.764	0.916 / -58.479	1.100 GHz
-0.824	0.909 / -61.144	1.150 GHz
-0.885	0.903 / -63.812	1.200 GHz
-0.948	0.897 / -66.485	1.250 GHz
-1.010	0.890 / -69.162	1.300 GHz
-1.073	0.884 / -71.846	1.350 GHz
-1.137	0.877 / -74.535	1.400 GHz
-1.200	0.871 / -77.232	1.450 GHz
-1.264	0.865 / -79.936	1.500 GHz
-1.327	0.858 / -82.647	1.550 GHz
-1.389	0.852 / -85.368	1.600 GHz
-1.451	0.846 / -88.098	1.650 GHz
-1.512	0.840 / -90.837	1.700 GHz
-1.573	0.834 / -93.587	1.750 GHz
-1.632	0.829 / -96.347	1.800 GHz
-1.690	0.823 / -99.118	1.850 GHz
-1.746	0.818 / -101.900	1.900 GHz
-1.801	0.813 / -104.694	1.950 GHz

图 11-12　以 dB 形式给出的 S11 参数随频率变化关系

（10）返回原理图设计窗口，双击 S_Param 元件修改属性，在“Noise”栏中，选中[Calculate noise]，单击[OK]按钮，单击工具栏中的按钮重新仿真。

（11）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置矩形图到数据窗口中，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 nf(2)参数（2 端口的噪声系数），单击[>>Add>>]按钮得到如图 11-13 所示的仿真曲线图。

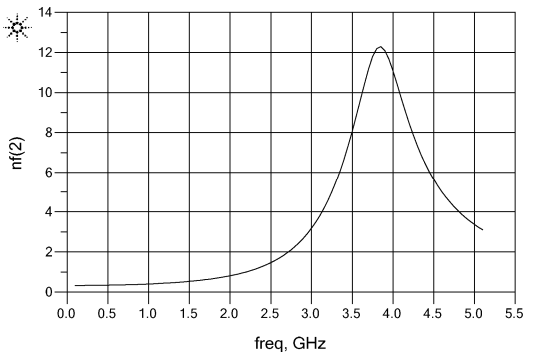


图 11-13　nf(2)参数随频率变化曲线

11.2.3　输入阻抗测试

（1）创建一个新项目，在 chapter11_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln2。在工具栏单击图标，查找元件 pb_mot_MMBR941_19961020 放置到原理图中。

（2）选择“Simulation-S_Param”类，选择控件，放置两个到原理图中合适位置。

（3）选择控件放置到原理图中合适位置。

（4）选择仿真器放置到原理图中合适位置，双击修改属性，如图 11-14 所示。

（5）单击接地图标设置各端口接地。

（6）单击工具栏中的图标把各元件连接成如图 11-15 所示电路。

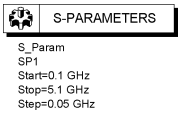


图 11-14　S 参数控制器

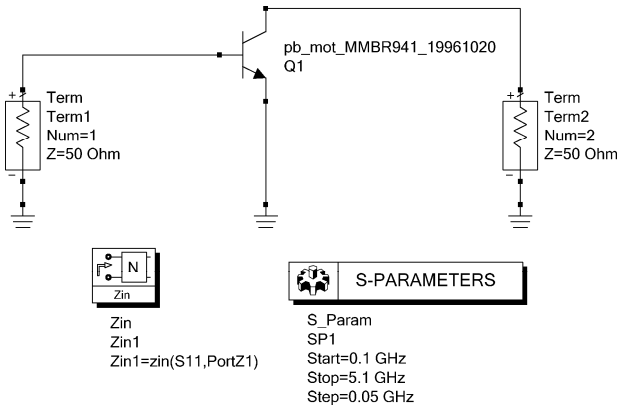


图 11-15　输入阻抗测试原理图

（7）单击工具栏中的按钮进行仿真，单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置列表窗口，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“Zin1”参数，得到如图 11-16 所示结果。由列表中可得到 2GHz 点的输入阻抗为 20.083/19.829，换算为实/虚部的形式为 18.89+j*6.81。

freq	Zin1
100.0 MHz	1.075E3 / -89.484
150.0 MHz	715.765 / -89.226
200.0 MHz	536.152 / -88.967
250.0 MHz	428.231 / -88.708
300.0 MHz	356.154 / -88.448
350.0 MHz	304.560 / -88.188
400.0 MHz	265.767 / -87.928
450.0 MHz	235.507 / -87.666
500.0 MHz	211.220 / -87.403
550.0 MHz	191.277 / -87.139
600.0 MHz	174.590 / -86.874
650.0 MHz	160.409 / -86.607
700.0 MHz	148.195 / -86.339
750.0 MHz	137.555 / -86.069
800.0 MHz	128.193 / -85.797
850.0 MHz	119.882 / -85.522
900.0 MHz	112.448 / -85.245
950.0 MHz	105.751 / -84.965
1.000 GHz	99.680 / -84.682
1.050 GHz	94.145 / -84.395
1.100 GHz	89.073 / -84.104
1.150 GHz	84.402 / -83.808
1.200 GHz	80.082 / -83.508
1.250 GHz	76.071 / -83.202
1.300 GHz	72.332 / -82.890
1.350 GHz	68.834 / -82.571
1.400 GHz	65.551 / -82.245
1.450 GHz	62.461 / -81.910
1.500 GHz	59.543 / -81.566
1.550 GHz	56.781 / -81.212

图 11-16　Zn1 与频率的关系

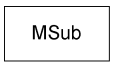
11.2.4　输入匹配设计

创建一个新项目，在 chapter11_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln3。

（1）选择“Tlines-Microstrip”类，选择控件，双击修改属性，如图 11-17 所示。

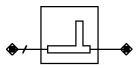
（2）选择“Passive Circuit DG - Microstrip Circuits”类，选择控件，双击修改属性，如图 11-18 所示。

（3）选择仿真器放置到原理图中合适位置，双击在“Noise”栏中修改属性，选中 Calculate noise 单击 OK 按钮，其他设置如图 11-19 所示。



MSUB
MSub1
H=0.8 mm
Er=4.3
Mur=1
Cond=5.88E+7
Hu=1.0e+033 mm
T=0.03 mm
TanD=0
Rough=0 mil

图 11-17　MSub 控件



DA_SSMatch1_shurupipei
DA_SSMatch1
Subst="MSub1"
F=2 GHz
Zin=50 Ohm
Zload=(18.89+j*6.81) Ohm
Zstub=50 Ohm
Zline=50 Ohm
Delta=0 mm

图 11-18　SSMatch 控件



S_Param
SP1
Start=0 GHz
Stop=6 GHz
Step=0.1 GHz

图 11-19　S 参数仿真器控件

（4）单击菜单栏【DesignGuide】→【Passive Circuit】，弹出对话框，选择“Passive Circuit Control Window…”，单击 OK 按钮，弹出对话框，如图 11-20 所示。单击“Design”选项，匹配网络生成后，单击按钮，进入匹配网络的子电路，如图 11-21 所示，单击按钮返回原理图界面。

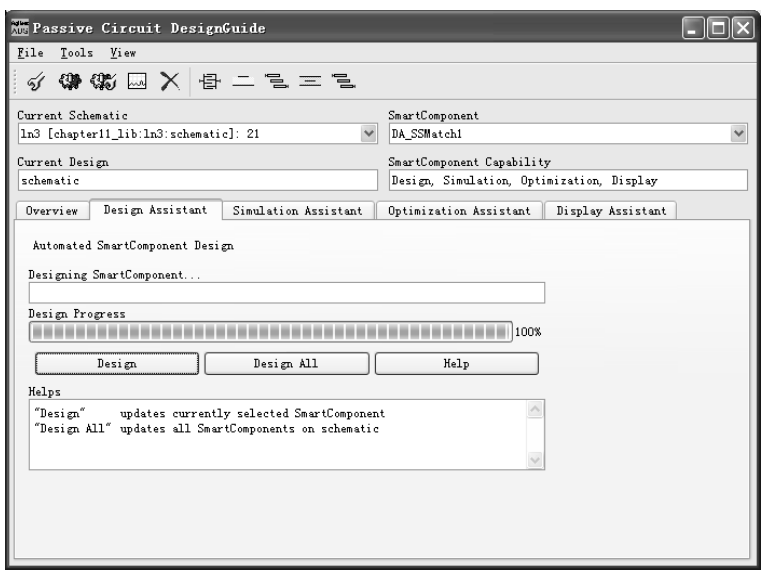


图 11-20　无源电路设计向导

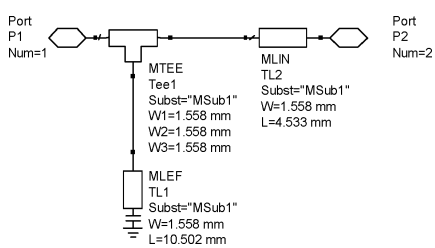


图 11-21　匹配网络的子电路

（5）选择“Simulation-S_Param”类，选择控件放置两个到原理图中合适位置，双击修改 Term2 特性阻抗为 18.89+j*6.81Ohm。

（6）选择控件放置到原理图中合适位置。

（7）单击接地图标设置各端口接地。

（8）单击工具栏中的图标把各元件连接成如图 11-22 所示电路。

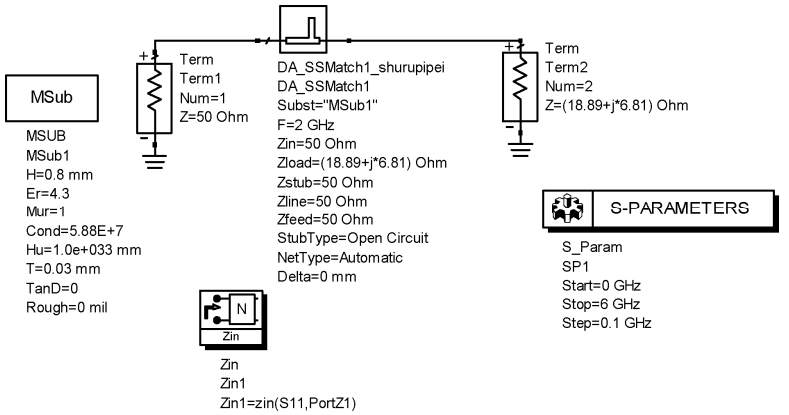


图 11-22　匹配后的电路原理图

（9）单击工具栏数据按钮进行仿真，仿真结束后会出现数据显示窗口。

（10）单击图形显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置矩形图到数据显示窗口中，这时会弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击 >>Add>> 按钮会弹出窗口设置单位（这里选择 dB），单击两次 OK 按钮后，显示 S11 随频率变化的曲线。

（11）同样的方法依次显示出 S12、S21 和 S22 参数曲线，如图 11-23 所示。

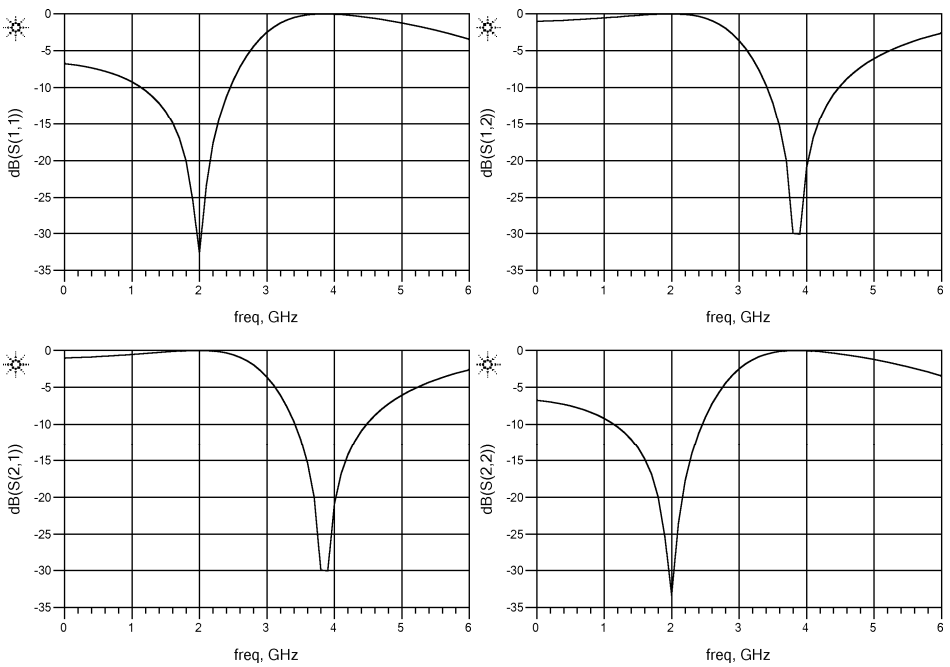


图 11-23　S 参数随频率变化曲线

（12）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置列表窗口，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里分别选择“Zin1”、“NFmin”和“nf（2）”参数，数据如图 11-24 所示。

freq	Zin1	NFmin	nf(2)
0.0000 Hz	20.082 / 19.822	4.239E-5	2.068E-4
100.0 MHz	20.638 / 21.145	1.229E-4	0.001
200.0 MHz	21.265 / 22.330	2.199E-4	0.001
300.0 MHz	21.966 / 23.371	3.352E-4	0.001
400.0 MHz	22.744 / 24.258	4.699E-4	0.001
500.0 MHz	23.603 / 24.979	0.001	0.002
600.0 MHz	24.547 / 25.522	0.001	0.002
700.0 MHz	25.582 / 25.873	0.001	0.002
800.0 MHz	26.714 / 26.016	0.001	0.002
900.0 MHz	27.950 / 25.933	0.001	0.002
1.000 GHz	29.297 / 25.602	0.002	0.003
1.100 GHz	30.764 / 24.995	0.002	0.003
1.200 GHz	32.358 / 24.079	0.002	0.004
1.300 GHz	34.084 / 22.813	0.003	0.004
1.400 GHz	35.946 / 21.146	0.003	0.004
1.500 GHz	37.936 / 19.017	0.003	0.005
1.600 GHz	40.035 / 16.354	0.004	0.006
1.700 GHz	42.200 / 13.076	0.004	0.006
1.800 GHz	44.350 / 9.093	0.005	0.007
1.900 GHz	46.351 / 4.326	0.005	0.008
2.000 GHz	48.004 / -1.281	0.006	0.009
2.100 GHz	49.047 / -7.722	0.007	0.011
2.200 GHz	49.192 / -14.899	0.008	0.013
2.300 GHz	48.206 / -22.591	0.009	0.015
2.400 GHz	46.016 / -30.480	0.011	0.017
2.500 GHz	42.759 / -38.206	0.013	0.020
2.600 GHz	38.739 / -45.458	0.015	0.024
2.700 GHz	34.317 / -52.026	0.017	0.029
2.800 GHz	29.808 / -57.823	0.020	0.035
2.900 GHz	25.430 / -62.848	0.024	0.044

图 11-24　Zin1、NFmin 和 nf（2）参数随频率变化表

11.2.5　输出匹配设计

以上的仿真结果可见，电路已经达到了比较好的性能，如良好的输入匹配、较高的增益，稳定系数和噪声系数都比较好。另一方面，输出匹配还不太好，电路的增益也进一步提高。

【说明】

☺ 输出匹配的设计同输入匹配一样，可以先计算输出阻抗再结合软件生成;

☺ 该方法并不是最合适的方法，仅是为了介绍优化工具的使用。

（1）创建一个新项目，在 chapter11_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln4。

（2）选择“Tlines-Microstrip”类，选择、、控件，双击分别修改属性，如图 11-25 所示，其中 TL1 和 TL3 元件长度 *L* 的变化范围都是{2mm to 40mm}。

（3）选择控件，双击修改属性，如图 11-25 所示。

（4）选择“Passive Circuit DG - Microstrip Circuits”类，选择控件，双击修改属性，如图 11-25 所示。

（5）在工具栏单击图标，查找元件 pb_mot_MMBR941_19961020 放置到原理图中。

（6）选择“Simulation-S_Param”类，选择控件放置两个到原理图中合适位置。

（7）选择仿真器放置到原理图中合适位置，设置如图 11-25 所示。

（8）单击接地图标设置各端口接地。

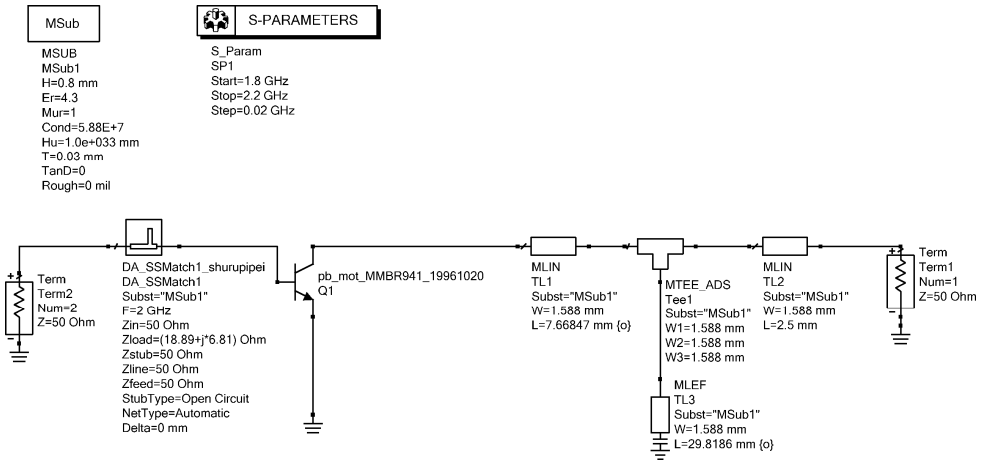


图 11-25　输出匹配电路原理图

（9）单击工具栏上的图标把各元件连接成如图 11-25 所示电路。

（10）选择“Optim/Stat/Yield/DOE”类，选择控件放置两个到原理图中合适位置，双击修改属性，如图 11-26 所示。

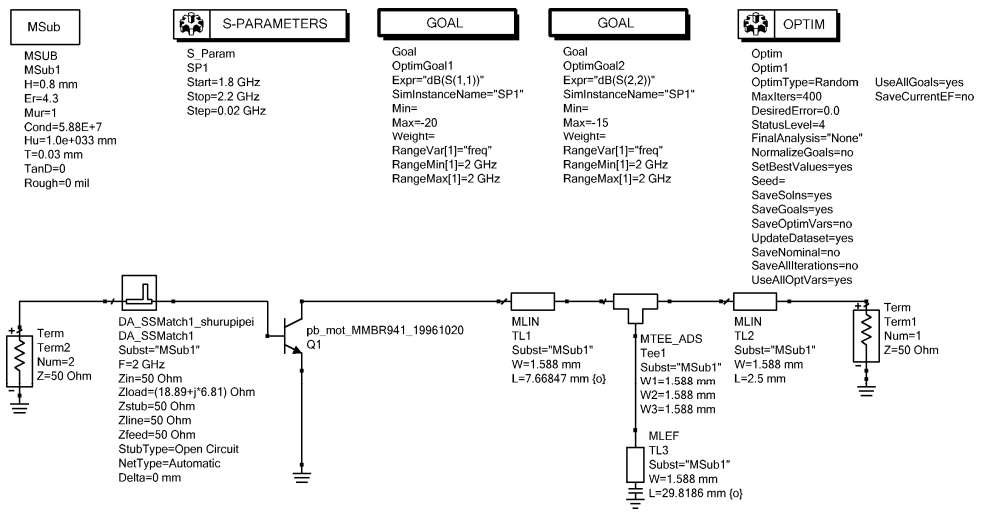


图 11-26　添加优化目标和优化控制器后的电路原理图

（11）选择控件放置到原理图中，双击该控件设置优化方法及优化次数。

（12）单击仿真优化按钮进行优化仿真。在优化过程中会打开状态窗口显示优化结果，当 CurrentEF=0，迭代结束。

（13）在优化完成后，单击优化窗口的Update Design...按钮，保存优化后的变量值，否则优化后的值将不保存。

（14）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，放置矩形图到数据显示窗口中，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)即 S11 参数，单击>>Add>>按钮弹出单位设置窗口（这里选择 dB），单击两次OK按钮后，显示 S11 随频率变化的曲线。同样的方法添加 S12、S21 和 S22 曲线，如图 11-27 所示。

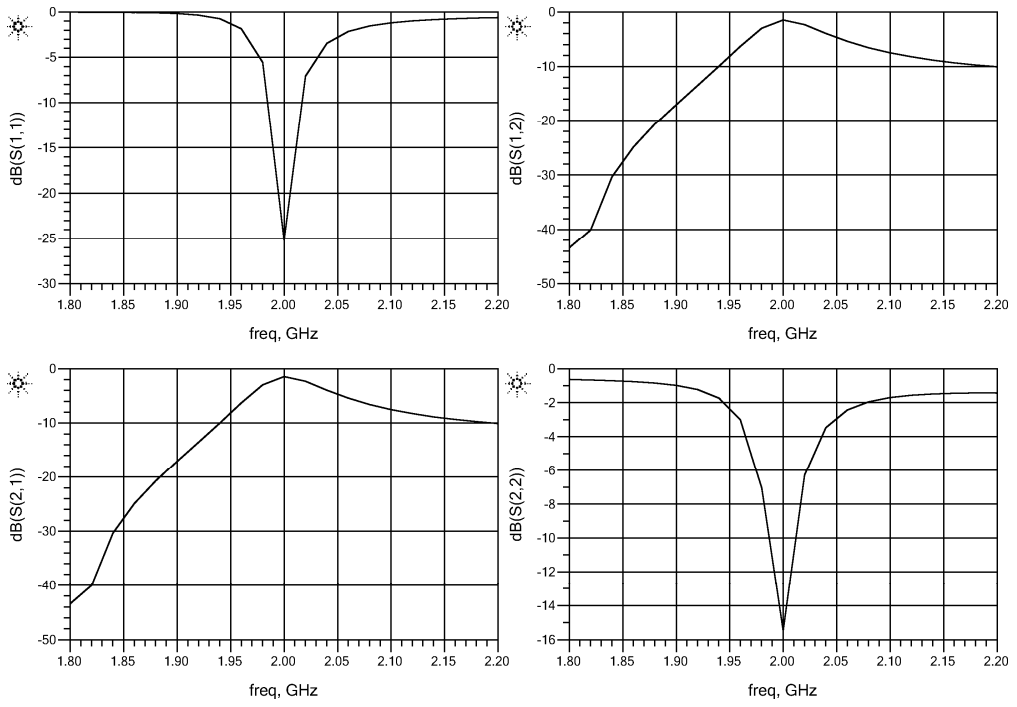


图 11-27　S 参数随频率变化曲线

11.2.6　完整原理图

（1）创建一个新项目，在 chapter11_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 ln5。建立原理图，如图 11-28 所示。

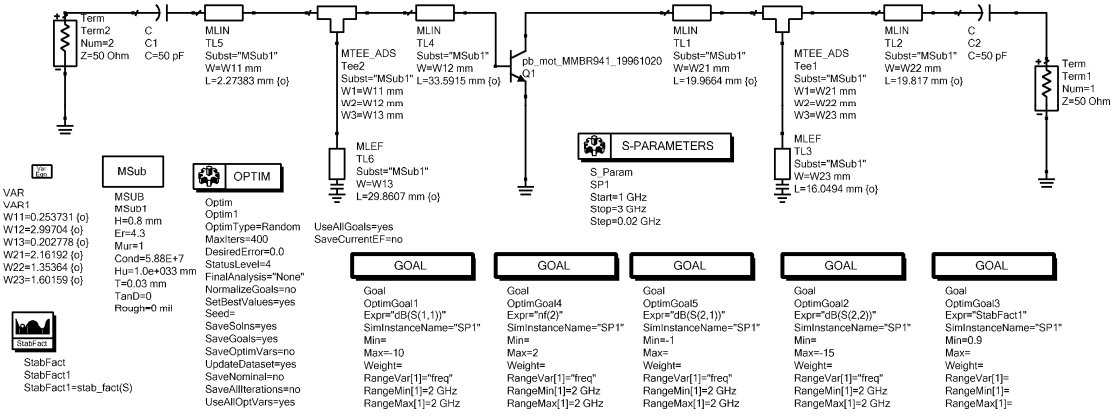


图 11-28　SP 模型仿真原理图

> 其中各段微带线宽度 *W* 变化范围为{0.2mm to 3mm}，长度 *L* 变化范围为{2mm to 40mm}。

（2）仿真结果输出，如图 11-29 所示。

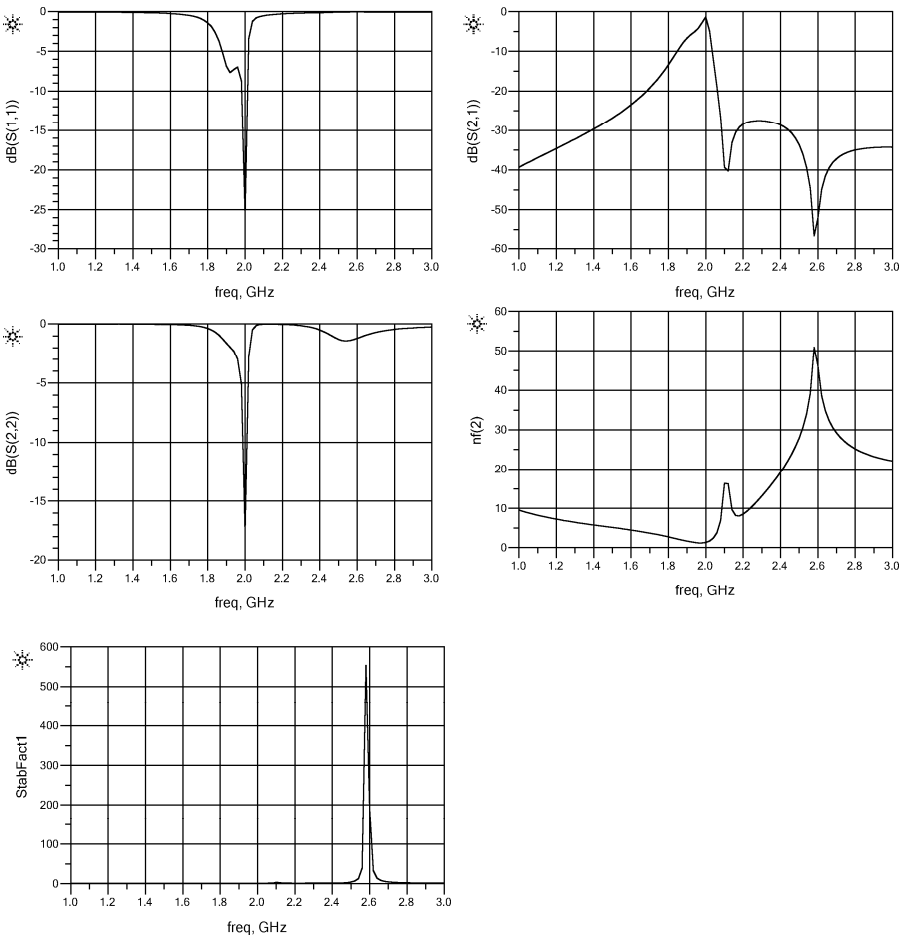


图 11-29　S 参数与频率关系曲线

11.3　思考题

（1）稳定系数为什么要在包括通带的全频域内满足条件？

（2）设计低噪声放大器的匹配电路和其他匹配电路有什么不同的地方？

（3）SP 模型能否进行 I-V 特性曲线仿真？仿真得到的结果能否代表这一器件的实际 I-V 特性？

（4）在加入馈电时使用 1/4 波长高阻线的原理是什么？还有没有别的方法加入馈电？

（5）微带电路的接地方式与数字或低频模拟电路有什么区别？为什么？

（6）如果要减小低噪声放大电路的尺寸，可以采取哪些措施？

第 12 章　镜像抑制混频器的设计与仿真

随着微波器件与技术的快速发展，在雷达和通信等领域，接收系统普遍采用了低噪声放大器作为前级，大大降低了系统的噪声系数，提高了灵敏度。混频器对接收系统的影响和作用似乎越来越小，但事实并非如此。所谓镜像信号边带是有用信号边带相对于本振信号对称的另一个边带，它与本振混频后产生的中频信号与信号边带产生的中频信号相同。当低噪声放大器频带较宽，且中频不高时，镜像噪声会通过混频器进入系统，造成系统噪声系数恶化。此时，镜像抑制混频器的设计至关重要。

本章应用 ADS2012 完成二极管电阻性混频器的设计，并利用谐波平衡法对混频器的非线性特性进行分析，给出 C 波段镜像抑制混频器的设计样例。

12.1　混频器的工作原理

混频器是超外差接收机和测量仪器的前端电路，与本振源结合，把信号频率降为中频信号，送入中频处理电路。理想的混频器是一个开关或乘法器，如图 12-1 所示。本振激励信号（LO，f_L）和载有调制信息的接收信号（RF，f_s）经过乘法器后得到许多频率成分的组合，经过一个滤波器后得到中频信号（IF，f_{IF}）。

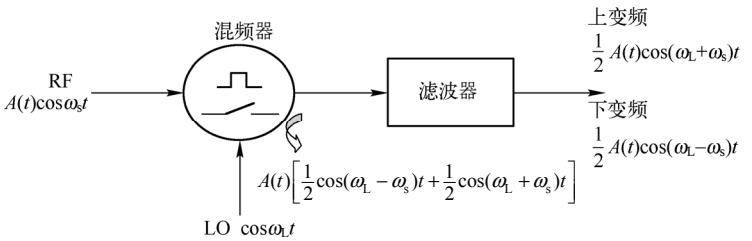


图 12-1　理想混频器

通常，RF 的功率比 LO 的小得多，不考虑调制信号的影响，乘法器的输出频率为

$$f_d = nf_L \pm f_s$$

微波工程中，可能的输出信号为三个频率之一：

$$\text{差频或超外差}\quad f_{IF} = f_L - f_s$$

$$\text{谐波混频}\quad f_{IF} = nf_L - f_s$$

$$\text{和频或上变频}\quad f_{IF} = f_L + f_s$$

最关心的是超外差频率，绝大部分接收机都是超外差工作，采用中频滤波器取出差频，反射和频，使和频信号回到混频器再次混频。超外差混频器的频谱如图 12-2 所示，RF 的频率关于 LO 的频率对称点为 RF 的镜频。镜频的功率和信号的功率相同，由于镜频

与信号的频率很近，可以进入信号通道而消耗在信号源内阻。恰当处理镜频，能够改善混频指标。

LO 控制的开关特性可以用几种电子器件构成，肖特基二极管在 LO 的正半周低阻、负半周高阻近似为开关。在 FET 中，改变栅源电压的极性，漏源之间的电阻可以从几欧姆变到几千欧姆。在射频或微波低端，FET 可以不要 DC 偏置，而工作于无源状态。BJT 混频器与 FET 类似。

根据开关器件的数量和连接方式，混频器可以分为三种：单端、单平衡、双平衡。微波实现方式就是要用微波传输线结构完成各耦合电路和输出滤波器，耦合电路和输出滤波器具有各端口的隔离作用。

1．微带平衡混频器

微带平衡混频器结构如图 12-3 所示。其功率混合电路采用 3dB 分支线定向耦合器，在各端口匹配的条件下，1、2 为隔离臂，从 1 到 3、4 端口以及从 2 到 3、4 端口都是功率平分而相位差 90°。

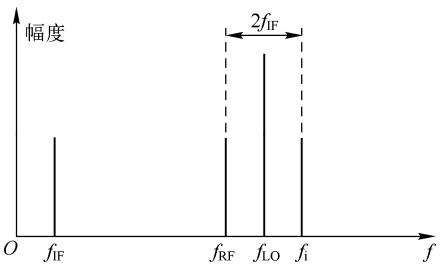


图 12-2　超外差混频器的频谱

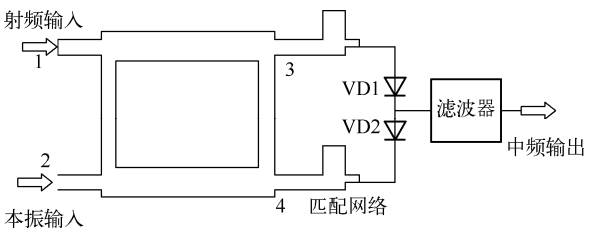


图 12-3　微带平衡混频器结构

设射频信号和本振分别从隔离臂 1、2 端口加入时，初相位都是 0°，考虑到传输相同的路径不影响相对相位关系。通过定向耦合器，加到 VD1、VD2 上的信号和本振电压分别为：

VD1 上电压

$$V_{s1}=V_s\cos\left(\omega_s t-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$v_{L1}=V_L\cos(\omega_L t-\pi)$$

VD2 上电压

$$V_{s2}=V_s\cos(\omega_s t)$$

$$V_{L2}=V_L\cos\left(\omega_L t+\frac{\pi}{2}\right)$$

信号和本振分别以 $\frac{\pi}{2}$ 相位差分配到两只二极管上，这类混频器称为 $\frac{\pi}{2}$ 型平衡混频器。由一般混频电流的计算公式，并考虑到射频电压和本振电压的相位差，可以得到：

VD1 中混频电流为

$$i_1(t)=\sum_{n,m=-\infty}^{\infty}\sum^{\infty}I_{n,m}\exp\left[\mathrm{jm}\left(\omega_s t-\frac{\pi}{2}\right)+\mathrm{jn}(\omega_L t-\pi)\right]$$

同样，VD2 中混频电流为

$$i_2(t)=\sum_{n,m=-\infty}^{\infty}\sum^{\infty}I_{n,m}\exp\left[\mathrm{jm}(\omega_s t)+\mathrm{jn}\left(\omega_L t+\frac{\pi}{2}\right)\right]$$

当 $m=\pm1$，$n=\pm1$ 时，利用 $I_{-1,+1}=I_{+1,-1}$ 的关系，可以求出中频电流为

$$i_{IF}=4\left|I_{-1,+1}\right|\cos\left[(\omega_s-\omega_L)t+\frac{\pi}{2}\right]$$

2．主要技术指标

【变频损耗】尽管混频器的器件工作方式是幅度非线性，但仍希望它是一个线性移频器。变频后输出信号的幅度变化就是变频损耗或增益。一般地，无源混频器都是变频损耗。二极管混频器的变频损耗包括混合网络损耗（约 1.5dB）、边带损耗（约 3dB）、谐波损耗（约 1dB）和二极管电阻损耗（约 1.5dB），典型值约为 7dB。在肖特基二极管电路中增加中频匹配电路来处理谐波，可以实现 4dB 变频损耗的混频器。

【噪声系数】描述信号经过混频器后质量变坏的程度。定义为输入信号的信噪比与输出信号的信噪比的比值。这个值的大小主要取决于变频损耗，还与电路的结构有关。肖特基二极管的导通电流直接影响混频器的白噪声，这个白噪声随电路的不同而不同，在混频器的变频损耗上增加一个小量。如变频损耗为 6dB，白噪声为 0.413dB，则噪声系数为 6.413dB。这种增加量随本振功率的变化不是线性的。混频器性能与本振功率有最佳值。

【线性特性】

☺ ldB 压缩点：在输入射频信号的某个值上，输出中频信号不再线性增加，而是快速趋于饱和。拐点与线性增加相差 1dB 的信号电平。混频器的 1dB 压缩点与本振功率有关，因为混频器是本振功率驱动的非线性电阻变频电路。对于双平衡混频器，1dB 压缩点比本振功率低 6dB。

☺ 1dB 减敏点：描述混频器的灵敏度迟钝的特性，与 ldB 压缩点有关，也是雷达近距离盲区的机理。对于双平衡混频器，1dB 减敏点比 1dB 压缩点低 2～3dB。

☺ 动态范围：最小灵敏度与 1dB 压缩点的距离，用 dB 表示。通常的动态范围要大于 60dB。动态范围的提高，意味着系统成本的增加。

☺ 谐波交调：与本振和输入信号有关的交调杂波输出。

☺ 三阶交调：输入两个信号时的 IP3，定义为 1dB 压缩点与三阶输出功率线的距离。

【本振功率】混频器的指标受本振功率控制。若本振功率不够，混频器就达不到预定指标。产品混频器都是按功率 dBm 值分类的，如 7dBm、10dBm、17dBm 本振（LO）。

【端口隔离】由于三个端口 LO、RF、IF 频率不同，互相隔离程度的指标，dB 越高越好。端口隔离与电路设计、结构、器件和信号电平有关，一般要大于 20dB。

【端口 VSWR】三个端口的驻波比越小越好。尤其是 RF 口，它会影响整个系统的灵敏度。

【直流极性】一般地，射频和本振同相时，混频器的直流成分是负极性。

【功率消耗(简称功耗)】功耗是所有电池供电设备的首要设计因素。无源混频器消耗 LO 功率，而 LO 消耗直流功率，LO 功率越大，消耗直流功率越多。混频器的输出阻抗对中放的要求也会影响中放的直流功耗。

12.2 镜像抑制混频器的设计

利用 ADS2012 设计 C 波段微带镜像抑制混频器，分析混频器的非线性特性。混频器技术指标如下：

☺ 信号频率（RF）：3.6GHz
☺ 本振频率（LO）：3.8GHz
☺ 中频频率（IF）：200MHz
☺ 噪声系数：15dB
☺ 镜像抑制度：15dB

12.2.1 3dB 定向耦合器设计

（1）创建新项目，新建项目空间，命名为 chapter12_wrk，其他选项默认。新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 3db。

（2）在“Tlines-Microstrip”类中，选择，并双击编辑属性，其中 H=0.6mm，Er=4.2，Mur=1，其他属性可以默认。选择微带传输线和三端口器件，按照图 12-4 所示连接电路图，并设置相应参数。

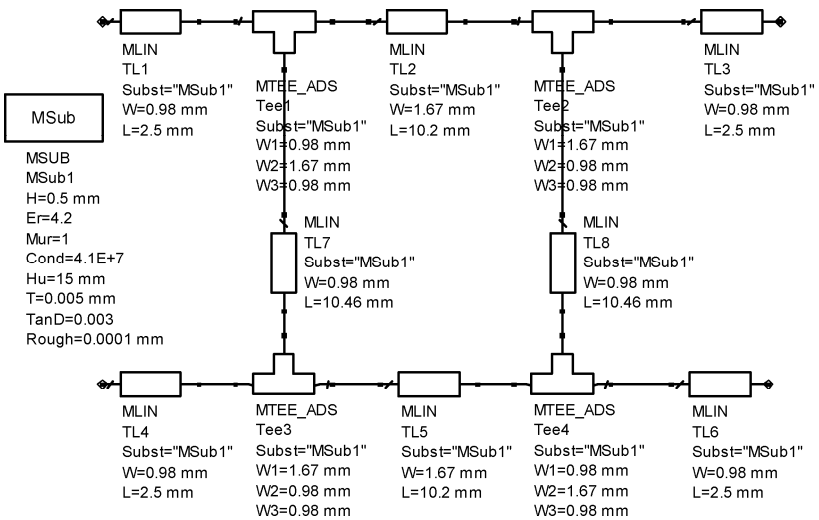


图 12-4 3dB 定向耦合器原理图

> 其中 50Ω传输线的线宽为 0.98mm，长度为 10.46mm。35Ω传输线的线宽为 1.67mm，长度为 10.2mm。可以利用 ADS 自带工具 LineCalc 计算。

（3）在“Simulation-S_Param”类中，选择仿真器和“Term”放置在原理图中，如图 12-5 所示。

（4）双击，修改里面的属性，要求扫描频率为 3～5GHz，扫描步长为 100MHz。

（5）保存电路，单击按钮，进行仿真。

（6）在数据显示窗口中单击按钮，选择相应端口，分析端口的耦合度及回波损耗，如图 12-6 所示。

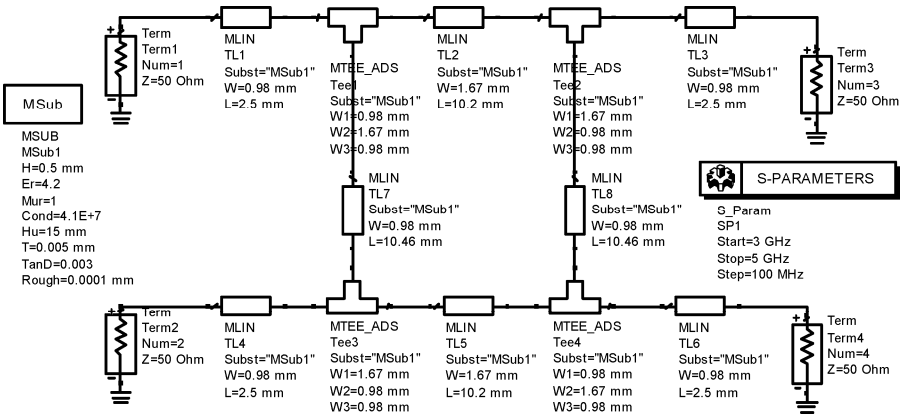
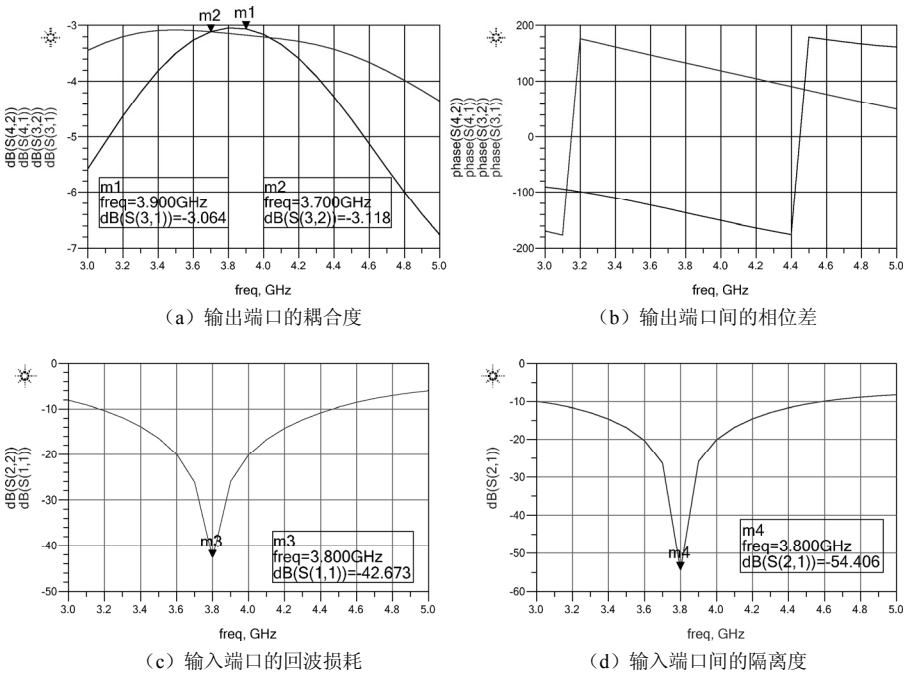


图 12-5　3dB 定向耦合器仿真电路图



（a）输出端口的耦合度　（b）输出端口间的相位差

（c）输入端口的回波损耗　（d）输入端口间的隔离度

图 12-6　端口仿真曲线

12.2.2　低通滤波器设计

在 chapter12_wrk 项目空间新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 lbf。

（1）在“Lumped-Components”类中，选择电容控件和电感控件，按照图 12-7 所示设计电路。

（2）在“Simulation-S_Param”类中，选择仿真器，并设置扫描频率为 0.01～5GHz，步长为 100MHz。

（3）保存电路，单击按钮，进行仿真。

（4）在数据显示窗口中单击按钮，选择加入 S21，仿真曲线如图 12-8 所示。

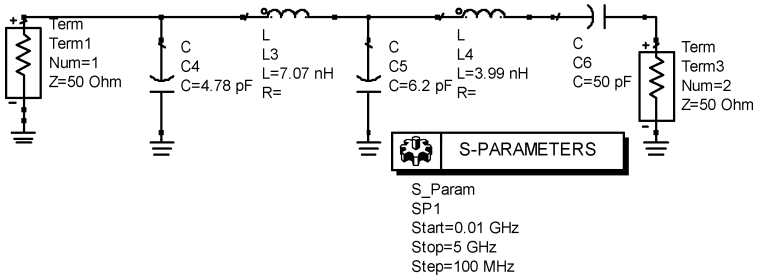


图 12-7　低通滤波器电路图

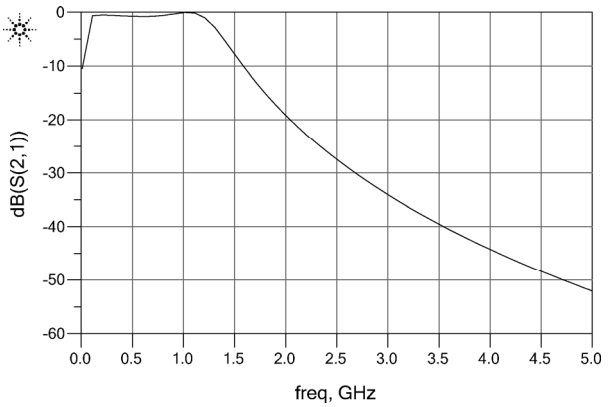


图 12-8　低通滤波器仿真曲线

12.2.3　完整的混频器电路

在 chapter12_wrk 项目空间新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 mix。混频器的完整电路图如图 12-9 所示。将其分成 8 个部分，下面针对每个部分进行具体设计。

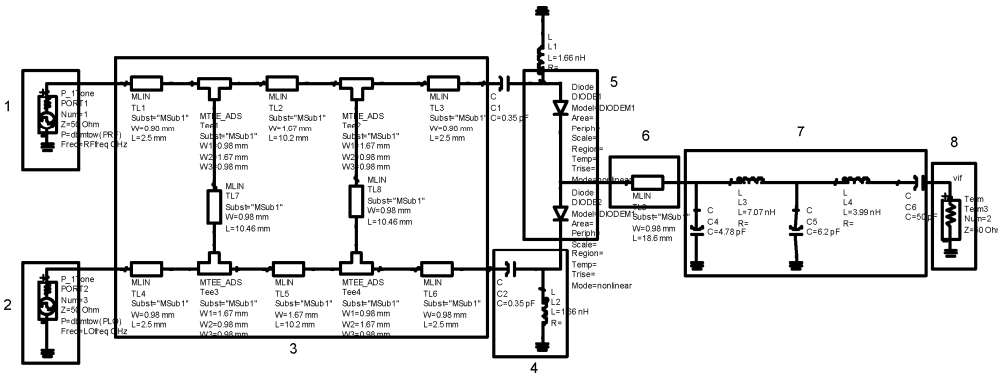


图 12-9　完整的混频器电路图

【第 1 部分】射频信号输入端口。在“Sources-Freq Domain”中，加入单音频信号源，按照图 12-10（a）所示进行参数设计。

【第 2 部分】本振输入信号端口。依照第 1 部分的方法进行参数设计，如图 12-10（b）所示。

【第 3 部分】3dB 定向耦合器。请参照 12.2.1 节的设计过程。

【第 4 部分】匹配电路，上下两路对称分布，参数设计如图 12-11 所示。

【第 5 部分】晶体管，其中晶体管是使用了模型。在“Devices-Diodes”类中，选择控件，并双击修改属性，建立二极管模型，具体参数设计参考图 12-12。选择控件，并在相应的位置把器件放好，其中 DIODE1 和 DIODE2 都引用二极管模板“DIODEM1”，如图 12-13 所示。

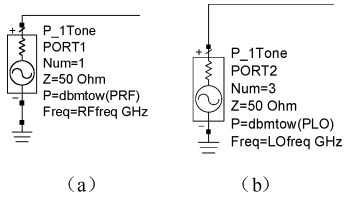


图 12-10　输入端电路图

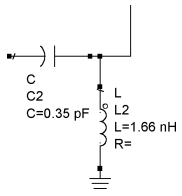


图 12-11　匹配电路图

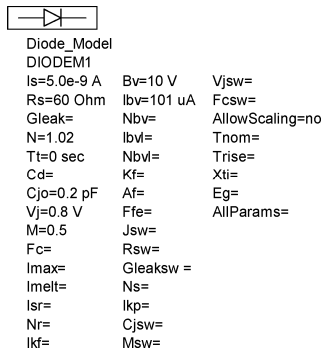


图 12-12　二极管模型参数

【第 6 部分】输出阻抗匹配电路，使用传输线阻抗匹配，参数设计如图 12-14 所示。

【第 7 部分】低通滤波器，具体电路参考 12.2.2 节内容。

【第 8 部分】负载，用“Term”来做输出负载，如图 12-15 所示。利用菜单栏中的控件，设置“vif”来标注与负载相连的线。该设置在以后仿真结果输出时使用。

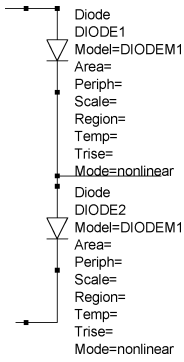


图 12-13　晶体管电路图

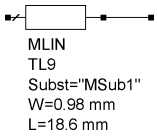


图 12-14　阻抗匹配电路

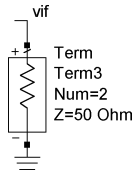


图 12-15　负载电路

第 1 部分是射频信号输入端口，端口号（Num）要设计为“1”；第 2 部分是本振输入信号端口，端口号要设计为“3”。这是一般用 HB Simulation 仿真的规范要求。

12.3　镜像抑制混频器的仿真

12.3.1　变量设置

（1）在电路原理图窗口中选择控件，双击修改其属性，如图 12-16 所示。

（2）在“Optim/Stat/Yield/DOE”类中，选择Meas Eqn控件，设置属性为“ConvGain=dBm(mix(vif,{−1,1}))−PRF”，如图 12−17 所示。



图 12−16　VAR 设置

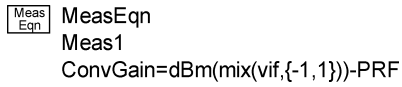
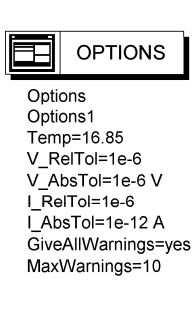


图 12−17　MeasEqn 设置

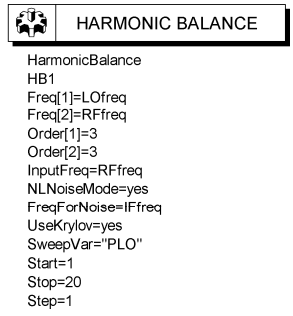
12.3.2　仿真器配置

（1）在“Simulation-HB”类中，选择HB控件和Options控件，先双击Options修改其属性，主要是把温度改为符合 IEEE 标准的 16.85℃，如图 12−18（a）所示。

（2）双击HB控件，配置谐波平衡仿真器，具体参数如图 12−18（b）所示。



（a）



（b）

图 12−18　仿真器属性设置

（3）保存电路，单击按钮，进行仿真。

（4）在出现的数据显示窗口中，选择控件，添加 vif，在弹出的对话框中单击 Trace Options... 按钮，在弹出的对话框“Trace Expression”栏输入 dBm（vif）表达式，单击 OK 按钮可以显示中频输出的频谱分量，如图 12−19 所示，仿真曲线如图 12−20 所示。

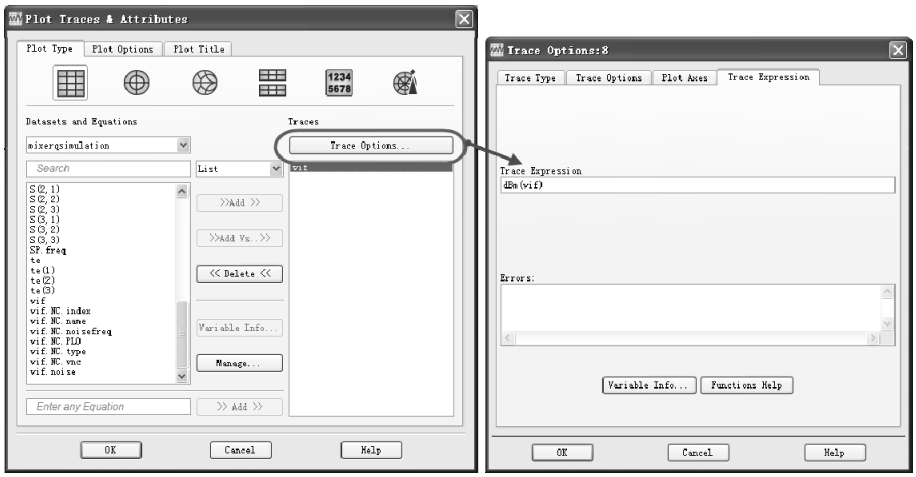


图 12−19　中频输出频率设置

（5）选择控件，选择显示“ConvGain”数据，如图 12-21 所示。

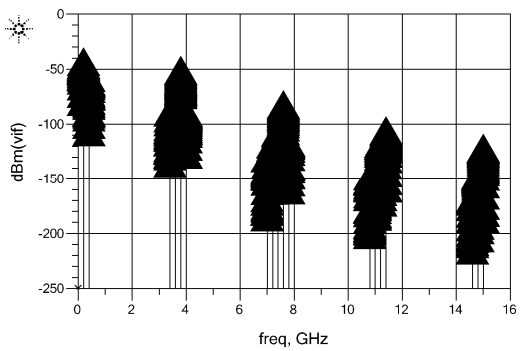


图 12-20　仿真曲线

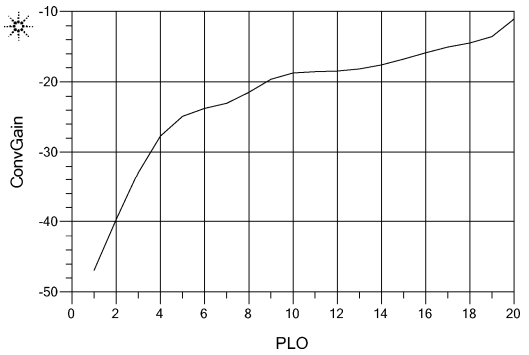


图 12-21　ConvGain 仿真曲线

12.3.3　噪声系数仿真

把 mix 原理图另存为 mixnio。在上面仿真的基础上，把仿真器修改一下可以得到噪声系数的仿真结果。

（1）双击，单击“Sweep”选项卡，修改“Parameter to sweep”属性，如图 12-22 所示。表示不再对本振功率“PLO”进行扫描，其他项目不需要做任何改动。

（2）保存电路，单击按钮，进行仿真。

（3）在数据显示窗口中选择控件，添加“nf(2)”，结果如图 12-23 所示。

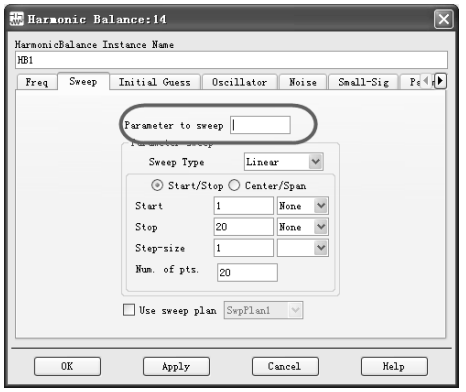


图 12-22　噪声系数的仿真设置

noisefreq	nf(2)
200.0 MHz	17.247

图 12-23　噪声系数的值

12.3.4　噪声系数分析

把 mixnio 原理图另存为 mixnio1。在前面噪声仿真的基础上进行如下操作。

（1）修改变量，如图 12-24 所示。

（2）把射频输入端的功率源换成“Term”，如图 12-25 所示。

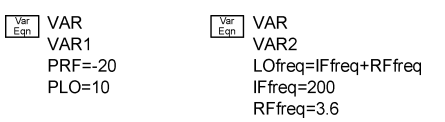


图 12-24　修改变量

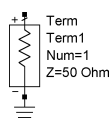


图 12-25　Term 设置

（3）在“Simulation-HB”类选择控件，双击修改其属性，如图 12-26 所示，表示频率扫描从 1.0GHz 到 6.0GHz，步长为 0.1GHz。

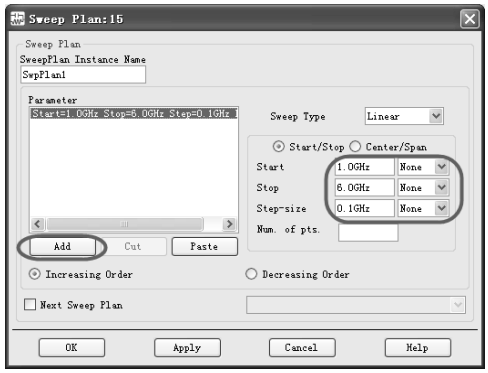


图 12-26 “Sweep Plan”设置

（4）配置仿真器，如图 12-27 所示。

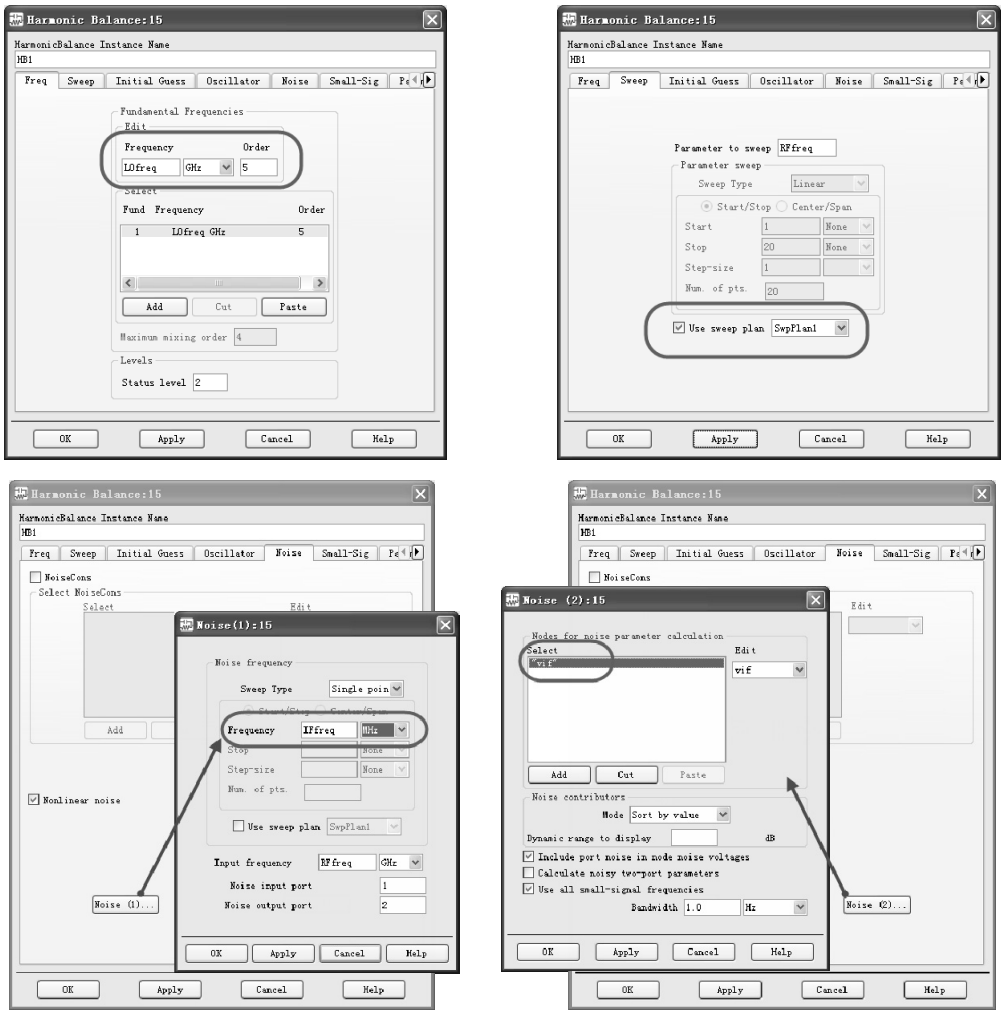


图 12-27 仿真器配置

（5）保存电路，单击按钮，进行仿真。

（6）在数据显示窗口中单击控件，单击 nf（2），然后单击 >>Add Vs..>> 按钮，弹出对话框，选中 HB_NOISE.RFfreq，如图 12-28 所示。仿真曲线如图 12-29 所示。

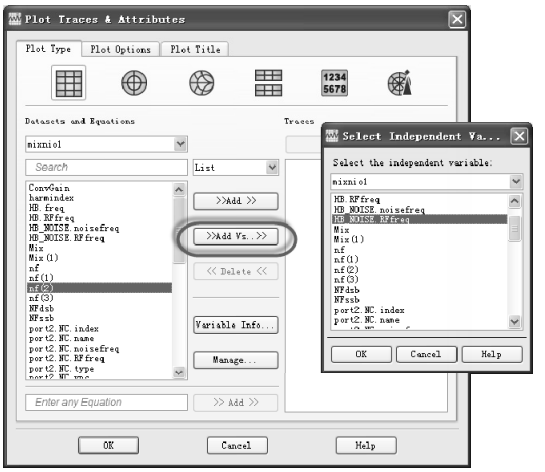


图 12-28　噪声系数设置

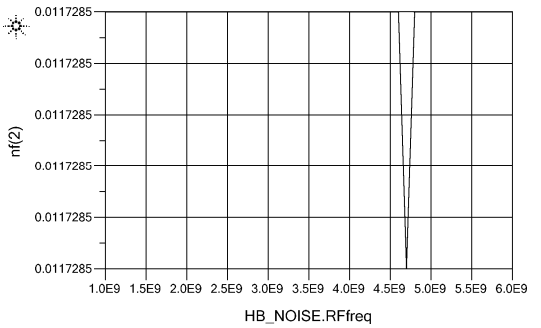


图 12-29　噪声系数随频率变化情况

12.4　思考题

（1）3dB 定向耦合器与第 9 章介绍的功分器有什么区别和联系？怎样从仿真曲线分析 3dB 定向耦合器性能指标的好坏？

（2）低通滤波器模块在混频器中起什么作用？如果低通滤波器设计指标不好，对混频器的性能指标有怎样的影响？

（3）请读者根据仿真曲线分析噪声系数、三阶交调系数对混频器性能指标的影响。

（4）请读者将混频器原理图仿真转化成版图仿真，总结版图仿真应该注意的问题。

第 13 章　压控振荡器的设计与仿真

射频/微波振荡器用来产生射频/微波信号，是微波系统中必不可少的部件。虽然在很多场合已大量使用频率合成器，但频率合成器本身就是由参考源和两个压控振荡器构成的。可见，振荡器本身有着很重要的研究意义。

振荡器的核心部分是有源器件和谐振回路。小信号振荡器用于接收机，大信号振荡器用于发射机，功率再大就需要大功率放大器。全固态化振荡器已经广泛使用，在个别场合还用到大功率电真空器件。

本章介绍压控振荡器的结构、原理、设计方法，结合 ADS2012 完成振荡频率在 1.8GHz 压控振荡器的设计与仿真。

13.1　振荡器的基本原理

振荡器是一种不需要外加输入信号就能够自激输出交变信号的电子装置，起到把直流电源能量转变为交流输出能量的作用。根据振荡器输出信号波形的不同，可以将振荡器分为正弦波振荡器和非正弦波振荡器，其中非正弦波振荡器一般为多谐振荡器，它产生的信号可以是方波或三角波等。按照振荡器的原理，可以将振荡器分为反馈振荡器和负阻振荡器。本章设计的是一个正弦负阻型振荡器。

振荡器设计与放大器设计很类似。对于放大器设计来说，S11 和 S22 都小于 1，可以用圆图来设计 M_1 和 M_2；而对于振荡器设计来说，为了产生振荡，S11 和 S22 均大于 1。从而可以利用同样的晶体管、同样的直流偏置电路和同样的一组 S 参数进行振荡器设计，对于负载来说，并不知道是被接到振荡器，还是被接到放大器，如图 13-1 所示。

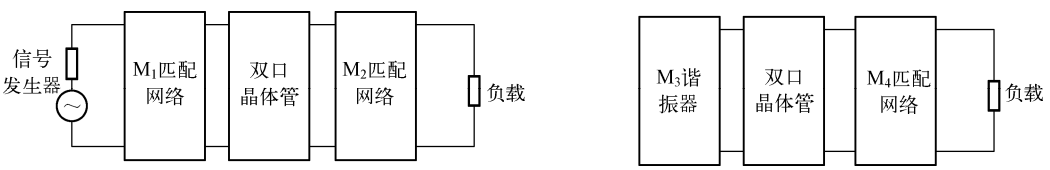


图 13-1　放大器和振荡器设计方框图

13.1.1　主要技术指标

射频/微波振荡器的主要技术指标是频率和功率。

1. 工作频率

振荡器的输出信号基本上是一个正弦信号。要做到振荡频率绝对准确是不可能的。频率越高，误差越大。影响频率的因素很多，如环境温度、内部噪声、元件老化、机械振动、

电源纹波等。实际设计中，针对指标侧重点，应采取相应的补偿措施。调试中，也要有经验和技巧，才能达到预期的频率指标。关于频率经常会遇到下列概念。

【频率精度】频率精度有绝对精度（Hz）和相对精度（ppm）两种表示方式。相对精度是最大频偏和中心频率的比值。绝对精度是在给定环境条件下的最大频偏。

【频率温漂】随着温度的变化，物质材料的热胀冷缩引起的尺寸变化会导致振荡器的频率偏移，这种频偏是不可避免的，只能采取恰当的方法降低。常用的方法有：温度补偿（数字或模拟微调）、恒温措施等，用 MHz/℃或 ppm/℃描述。

【年老化率】随着时间的推移，振荡器的输出频率也会偏移，用 ppm/年描述。

【电源牵引】电源的纹波或上电瞬间会影响振荡器的频率精度，也可看作电源的频率调谐，用 Hz/V 表示。在振荡器内部可以通过增加稳压电路和滤波电容来改善这一指标。

【负载牵引】在振荡器与负载紧耦合的情况下，振荡频率会受到负载的影响。使负载与振荡器匹配，增加隔离器或隔离放大器，减小负载的牵引作用。

【振动牵引】振荡器内谐振腔或晶振等频率敏感元件随机械振动的形变，会影响振荡器的输出频率。振动敏感性与元件的安装和固定有关，用 Hz/g 表示。

【相位噪声】相位噪声是近代振荡器和微波频率合成器的关键指标。它是输出信号时域抖动的频域等效。相位噪声、调频噪声和抖动是同一问题的不同表达方式，因为振荡器含有饱和增益放大器和正反馈环路，故幅度噪声增益和相位噪声增益都有限。幅度和相位变化与平均振荡频率有关。用足够分辨率的频谱仪测量振荡器，噪声会使窄谱线的下端变宽，噪声按照 f^{-3} 或 f^{-2} 下降。振荡器的反馈环的环增益按 f^{-2} 而不是按谐振频率下降。f^{-1} 因子与器件和谐振器的低频调制有关。

相位噪声用 $L(f_m)=(P_{SSB}(f_m)/\text{Hz})/P_C$ 表示，可用频谱仪或相位噪声分析仪测量。$P_{SSB}(f_m)/\text{Hz}$ 是指 1Hz 带宽内相位噪声功率。f_m 表示离开载频的边频，也是对载频的调制频率，故称作调频噪声。

2．输出功率

功率是振荡器的又一重要指标。如果振荡器有足够的功率输出，就会降低振荡器内谐振器的有载 Q 值，导致功率随温度变化而变化。因此，选用稳定的晶体管或采用补偿的办法，也可增加稳幅电路。这样，又会增加成本和噪声。为了降低振荡器的噪声，让振荡器输出功率小一些，可降低谐振器的负载，增加一级放大器，以提高输出功率。通常，振荡器的噪声比放大器的噪声大，故功率放大器不会增加额外噪声。如果振荡器是可调谐的，还要保证频带内功率的平坦度。

3．调谐范围

对于可调谐振荡器，有很多关于调谐的指标。

【调谐带宽】通常是指调谐的最大频率和最小频率，与中心频率无关。但对于窄带可调振荡器（如带宽为 10%），可以用中心频率来计算。

【调谐范围】调谐范围对应变容管的电压范围或 YIG 的电流范围。为了维持振荡范围内的高 Q 特性，变容管的最小电压大于 0。

【调谐灵敏度】单位是 MHz/V，一般地，调谐灵敏度不等于调谐范围/电压范围。近似地，调谐灵敏度在中心频率的小范围内测量。

【调谐灵敏度比】最大调谐灵敏度/最小调谐灵敏度。在 PLL 的压控振荡器中，由于这个参数会影响到环路增益，因而特别重要。在低电压时，变容管电容最大，随着电压的增加，电容很快达到最大值。低电压时，电容的大范围变化会引起频率的范围变化大，意味着频率低端灵敏度高，频率高端灵敏度低。由图 13-2 所示的变容管的调谐特性可知，超突变结比突变结变容管调谐线性好，设计中要选线性好的一段并使调谐电压放大到合适的范围。

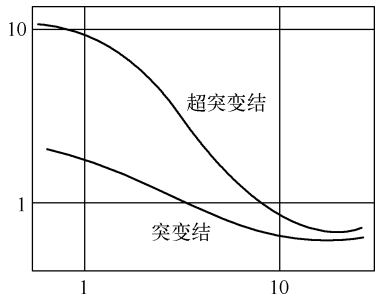


图 13-2 变容管的调谐特性

【调谐时间】最大调谐范围所用的时间。变容管的调谐速度比 YIG 的调谐速度快得多。

4．供电电源

供电电源是保证振荡器安全工作时所需的电源电压和电流。直流功率要有足够余量。

5．结构尺寸

振荡器的外形结构和安装尺寸受使用场合的限制。在给定的安装条件下，应合理布局电路，考虑散热，使振荡器能稳定工作。

13.1.2 常用元件

1．有源器件

用于射频/微波振荡器的有源器件及使用频段见表 13-1。

表 13-1 用于射频/微波振荡器的有源器件及使用频段

器 件 名 称	英 文 缩 写	频 段	说 明
双极结晶体管	HBT	5GHz 以下	用途广，噪声低
场效应管	MOSFET	1GHz 以下	特殊要求时，比 HBT 噪声低
	JFET		
	MESTET HEMIT	100GHz 以下	用途广泛，噪声低
负阻二极管	GUNN IMPATT	100GHz 以下	结构简单，噪声大
倍频器		所有频率	稳定，现多用

2．谐振器

用于射频/微波振荡器的谐振器及使用频段见表 13-2。一般以振荡器的成本、指标来选择谐振器。

表 13-2 用于射频/微波振荡器的谐振器及使用频段

谐振器类型	频 率 范 围	品质因数 Q	说 明
LC	1Hz～100GHz	0.5～200	Q 低，平面，成本高
变容器	1Hz～100GHz	0.5～100	Q 低，非线性，噪声大，可调

续表

谐振器类型	频 率 范 围	品质因数 Q	说　　明
带状线、微带线	1MHz～100GHz	100～1 000	尺寸大，平面，成本低，Q 高
波导	1～60GHz	1 000～10 000	尺寸大，成本高，Q 高
YIG	1～50GHz	1 000	需外加磁场，成本高，速度低，Q 高，调谐线性好
TL	0.5Hz～3GHz	200～1 500	成本高，Q 高，温度稳定
蓝宝石	1～10GHz	50 000	成本高，Q 高，温度稳定
介质 DR	1～30GHz	5 000～30 000	成本和体积大，Q 高
晶振	1kHz～0.5GHz	100 000～2 500 000	频率低，Q 高，温度稳定
声表 SAW	1MHz～2GHz	500 000	频率低，成本高，Q 高

下面设计一个压控振荡器，振荡频率在 1.8GHz 左右。读者可以进一步了解利用 ADS 设计压控振荡器的全过程。

13.2　振荡器初始电路设计与仿真

13.2.1　元件选取

振荡器的硅双极管采用 HP 公司生产的 AT41411，变容二极管选 MV1404。AT41411 的主要指标有：

☺ 低噪声特性：1GHz 噪声系数是 1.4dB，2GHz 噪声系数是 1.8dB;

☺ 高增益：1GHz 时增益为 18dB，2GHz 时增益为 13dB;

☺ 截止频率：7GHz，有足够宽的频带;

☺ 1.8GHz 时最佳噪声特性：V_{ce}=8V，I_c=10mA。

13.2.2　初始电路

（1）创建一个新项目，在 chapter13_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，弹出对话框，命名为 chushi。

（2）在“Sources-Time Domain”类中，选择控件；在“Lumped-Components”类中，选择、、控件，放置到原理图中。

（3）在工具栏单击图标，分别查找元件 pb_hp_AT41411_19921101 和元件 ap_dio_MV1404 放置到原理图中，单击接地图标，设置三个接地。

（4）单击工具栏上的 VAR 图标把变量控件 VAR 放置到原理图中，在电路图中双击该变量图标弹出变量设置窗口，添加参数“Rb”，如图 13-3 所示。

> 📖 “Name”栏中填变量名称，“Variable Value”栏中填变量的初值，单击 Add 按钮添加变量，然后单击 Tune/Opt/Stat/DOE Setup... 按钮，弹出菜单，选择“Optimization”选项卡，设置变量的取值范围，其中的“Enabled/Disabled”表示该变量是否能被优化。

（5）在工具栏单击图标，把各元件连接成如图 13-4 所示电路。

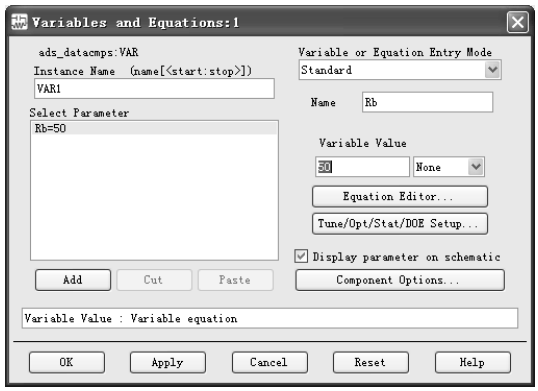


图 13-3 变量设置

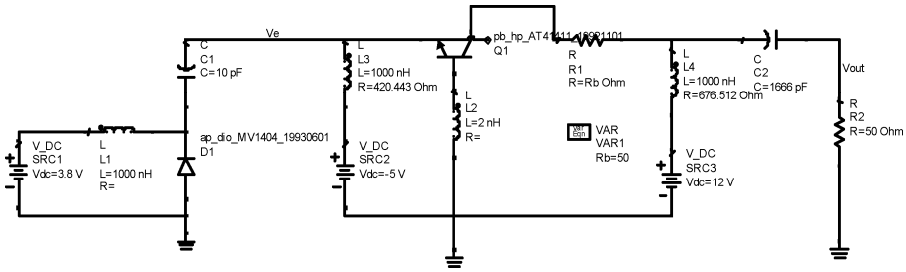


图 13-4 振荡器初始电路图

13.2.3 偏置电路

（1）在当前项目空间下，单击图标，弹出对话框，命名为 pianzhi，新建另一个电路原理图窗口。在“Sources-Time Domain”类中，选择控件；在“Lumped-Components”类中，选择控件，放置到原理图中，并双击修改参数，如图 13-5 所示。

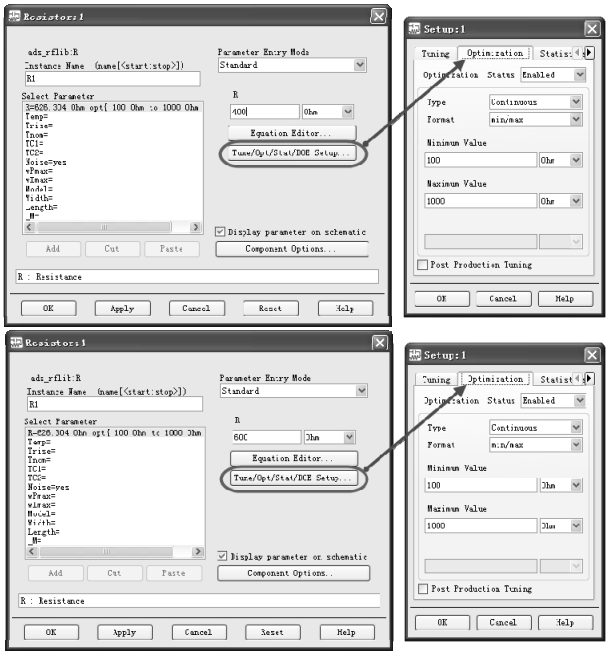


图 13-5 元件参数设置

> R_1 初始值为 400Ω，优化范围为 100～1 000Ω；R_2 初始值为 600Ω，优化范围为 100～1 000Ω。

（2）在“Probe Components”类中，选择控件，放置两个到原理图中，在工具栏单击图标，查找元件 pb_hp_AT41411_11921101，放置到原理图中。

（3）在“Simulation-DC”类中，选择控件，放置到原理图中，单击接地图标设置三个接地，按 NAME 按钮，定义“Vcb”、“Veb”两个节点。

（4）单击工具栏上的图标，按照图 13-6 所示连接电路。

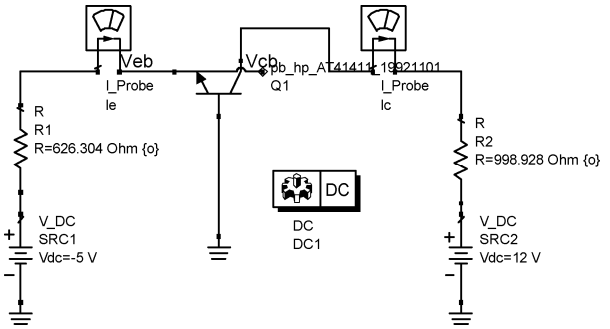


图 13-6　偏置电路

13.2.4　优化仿真

（1）在“Optim/Stat/Yield/DOE”类中，选择优化工具，放置到原理图中，双击修改参数，其中设置优化方法为 Random（随机），优化次数为 100 次。

由于采用双电源供电的方法，设置两个目标来进行两个偏置电阻的优化，考虑到振荡器中三极管的工作状态最好是远离饱和区，同时满足三极管 1.8GHz 时的最佳噪声特性，所以直流偏置优化目标为 I_c=10mA，V_{cb}=5.3V。

（2）选择两个优化目标控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 13-7 所示。完成上述操作后，完整优化仿真电路，如图 13-8 所示。

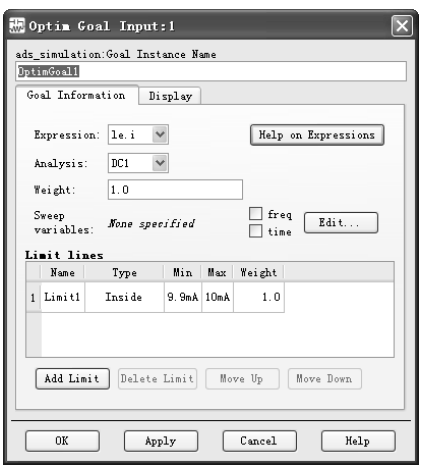


图 13-7　优化目标设置

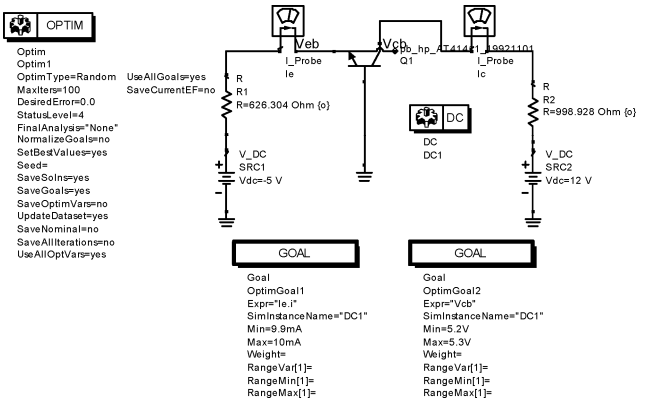


图 13-8　优化仿真电路图

（3）单击仿真优化按钮进行优化仿真，如图 13-9 所示。

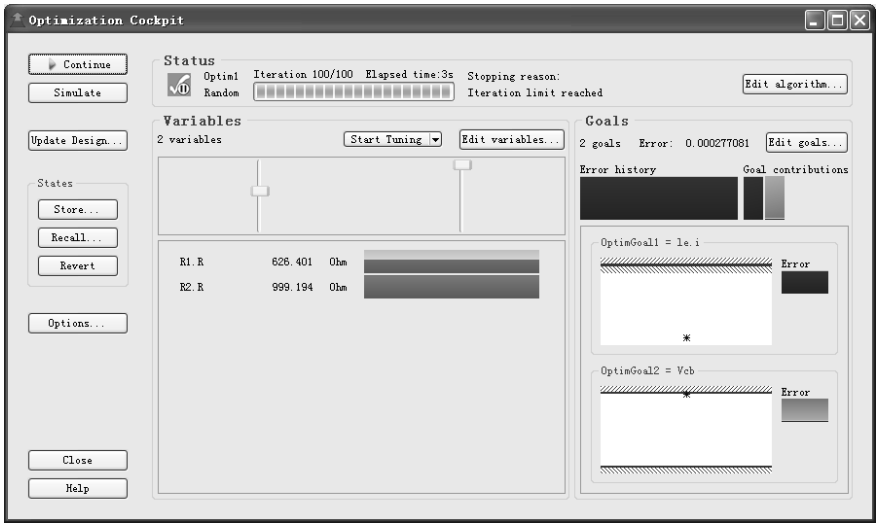


图 13-9　优化仿真

（4）优化完成后，单击工具栏上的按钮，单击控件 OPTIM，关掉优化控件。

（5）单击工具栏中的按钮，再进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，选择“R1.R”、“R2.R”参数，单击 >>Add>> 按钮，显示 R1.R、R2.R 数据，如图 13-10 所示。

R1.R	R2.R
626.401	999.194

图 13-10　仿真数据

13.3　可变电容 VC 特性曲线测试

（1）新建一个电路原理图窗口，命名为 vcceshi。在“Sources-Time Domain”类中，选择控件；在“Lumped-Components”类中，选择、控件，放置到原理图中。

（2）在工具栏单击图标，查找元件 ap_dio_MV1404 放置到原理图中。

（3）单击工具栏上的 VAR 图标，把变量控件 VAR 放置到原理图中，双击该图标设置变量，添加 Vbias 参数为“5”。

（4）在“Simulation-S_Param”类中，把仿真器、和“Term”放置到原理图中，单击接地图标设置两个接地，双击 S-PARAMETERS 和 PARAMETER SWEEP 修改里面的属性。属性设置及测试电路连接如图 13-11 所示。

（5）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（6）单击显示窗口左侧工具栏中的 Eqn 按钮，弹出窗口，在对话框里编辑公式为

```
Eqn C_Varactor=-1/(2*pi*freq[0,0]*imag(Z11[0]))
```

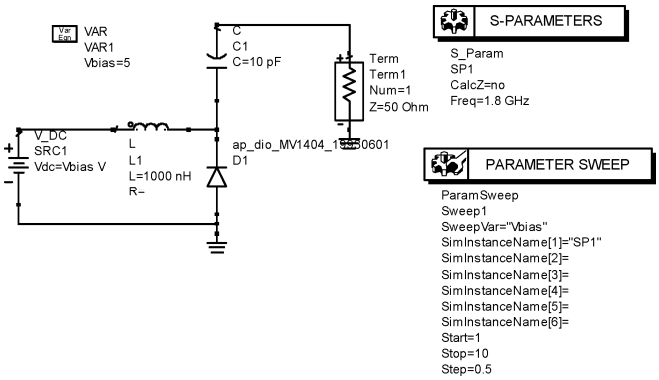
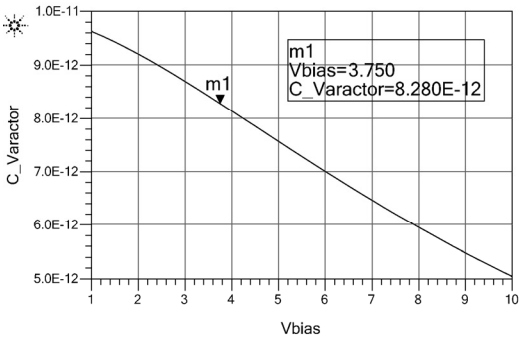


图 13-11　VC 特性测试电路

（7）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的“Datasets and Equations”下拉列表框中选择“Equations”选项，选择“C_Varactor”参数，单击 Add 按钮，得到 VC 曲线图，如图 13-12（a）所示。

（8）点击数据显示窗口左侧工具栏按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的“Datasets and Equations”下拉列表里选择“Equations”选项，选择“C_Varactor”参数，单击 Add 按钮，得到 VC 特性数据表格，如图 13-12（b）所示。



（a）曲线

Vbias	C_Varactor
1.000	9.623E-12
1.250	9.529E-12
1.500	9.427E-12
1.750	9.317E-12
2.000	9.202E-12
2.250	9.082E-12
2.500	8.956E-12
2.750	8.827E-12
3.000	8.694E-12
3.250	8.558E-12
3.500	8.420E-12
3.750	8.280E-12
4.000	8.138E-12
4.250	7.996E-12
4.500	7.853E-12
4.750	7.710E-12
5.000	7.567E-12
5.250	7.424E-12
5.500	7.282E-12

（b）数据

图 13-12　VC 特性测试结果

13.4　压控振荡器仿真分析

13.4.1　瞬时仿真

（1）新建一个原理图窗口，命名为 shunshi。在“Sources-Time Domain”类中，选择控件；在“Lumped-Components”类中，选择、、控件，放置到原理图中。

（2）在工具栏单击图标，查找元件 pb_hp_AT41411_11921101 和元件 ap_dio_MV1404 放置到原理图中。

（3）在“Simulation-Transient”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 13-13 所示。

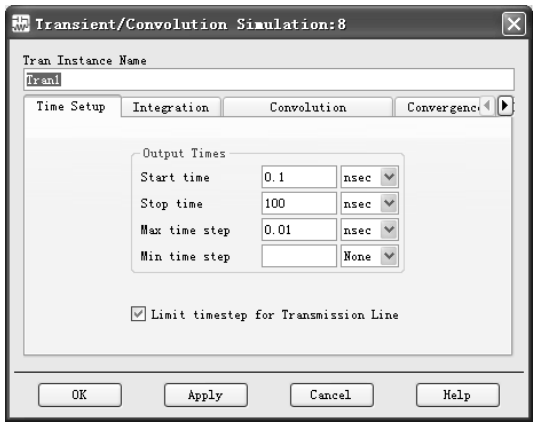


图 13-13　瞬时仿真器设置

（4）单击接地图标，设置三个接地，单击 NAME 按钮，定义“Ve”、“Vout”节点。单击工具栏上的图标，按照图 13-14 所示连接电路。

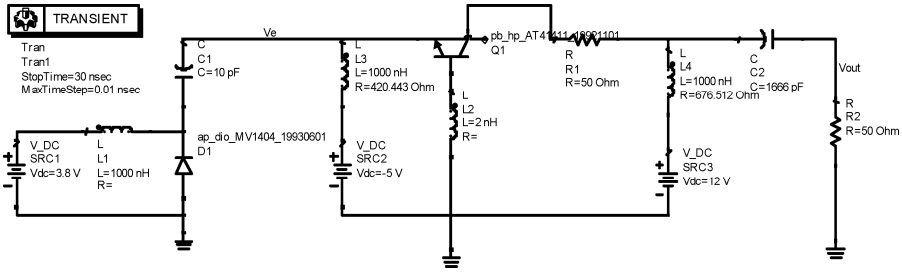


图 13-14　压控振荡器仿真电路

（5）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，选择“Vout”参数，单击 >>Add>> 按钮，得到 Vout 曲线，如图 13-15 所示。

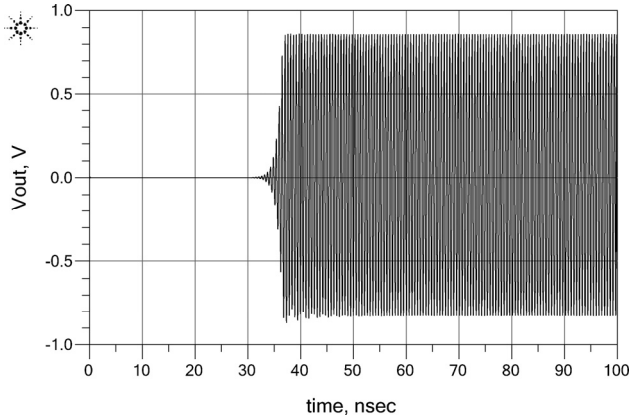


图 13-15　压控振荡器输出波形

（7）单击菜单栏【Marker】→【New】命令，出现“Insert Marker”窗口，单击要添加标记的曲线，曲线上出现倒三角标志，单击拖动此标志，可以看到曲线上各点的数值。

（8）单击图形显示窗口左侧工具栏中的Eqn按钮，弹出窗口，在对话框里编辑公式为

Eqn Spectrum=fs(Vout,,,,,,,indep(m1),indep(m2))

其中，“Vout”在 m1、m2 之间进行频率变换，这样出来的“Spectrum”是 m1 和 m2 之间的频谱。

（9）单击图形显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的“Datasets and Equations”下拉栏中选择“Equations”选项，选择“Spectrum”参数，单击“Add”按钮，可以看到输出 Spectrum 的曲线（m1 和 m2 之间的频谱分量）。

（10）加入 m3 可以知道振荡器大概振荡的频率，如图 13-16 所示。

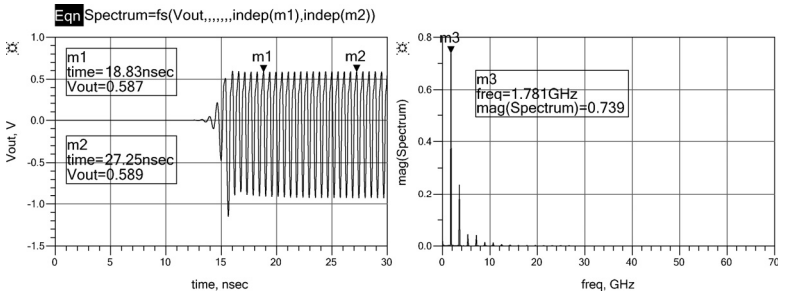


图 13-16　压控振荡器的仿真曲线

从 m1、m2 的数据可以看出，振荡波形相当稳定，幅度差可以不必考虑，频谱纯度较高。对 m1 和 m2 这段时域进行频域变换，可以看到振荡器振荡频率的频谱，从 m3 标记的数值可以看出，振荡器的振荡频率为 1.781GHz，与设计的指标 1.8GHz 有差距，需要进行调整。

13.4.2　参数调整

（1）由于 VCO 的振荡频率由变容二极管所在的谐振网络的谐振频率决定，经计算得到当变容二极管的电容为 8.25pF 时，谐振频率为 1.8GHz。

（2）在可变电容 VC 特性曲线中，如图 13-12 所示，可以确定在 8.25pF 时，偏置电压为 3.75V。

（3）重新返回到振荡器电路原理图，如图 13-14 所示，将可变定容的偏置电压 V_{dc} 改为 3.75V，并执行仿真。

（4）仿真结束后，在数据显示窗口中观察输出信号的时域波形和频域图，如图 13-17 所示。从图中可以看出振荡器的振荡频率为 1.799GHz，符合设计要求。

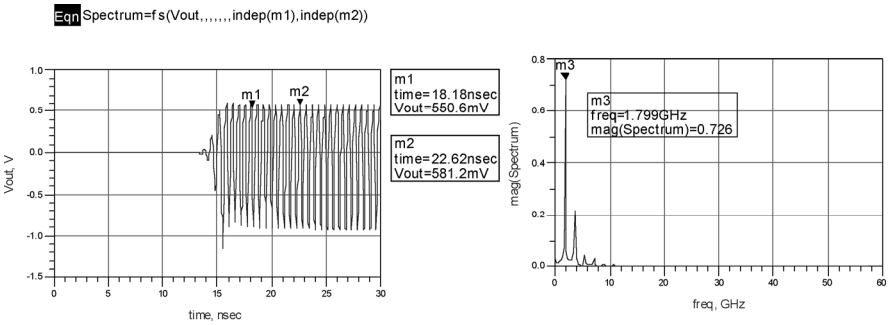


图 13-17　优化后压控振荡器输出波形

13.4.3 谐波仿真

（1）新建原理图，命名为 xiebo，压控振荡器原理图如图 13-14 所示，在“Simulation-HB”类中，选择控件，放置到该原理图中，双击，修改属性。

（2）在“Simulation-HB”类中，选择控件，放置到原理图中，与振荡器配合使用，接在反馈网络和谐振网络之间，这是谐波平衡法仿真相位噪声的需要。

（3）在“Filters-Bandpass”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性得到谐波平衡仿真电路，如图 13-18 所示。

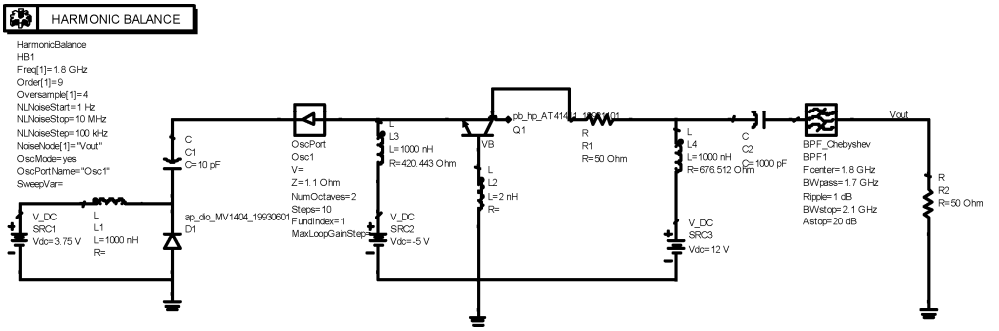


图 13-18　谐波平衡仿真电路图

（4）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出窗口，在对话框里编辑公式为

```
Eqn Spectrum=dBm(HB.Vout)
```

它表示计算输出 Vout 的功率谱，如图 13-19 所示。

> 从图 13-19 中的 m1 数据可以看出，基波频率 1.8GHz 上的能量最大。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的“Datasets and Equations”下拉列表框中选择“freq”参数，单击>>Add>>按钮，得到谐波与频率对应数据，如图 13-20 所示。

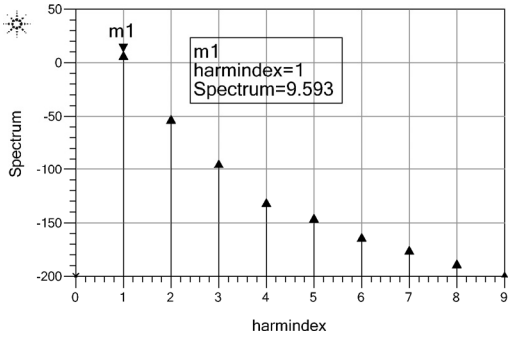


图 13-19　Vout 的功率谱密度

harmindex	freq
0	0.0000 Hz
1	1.726 GHz
2	3.451 GHz
3	5.177 GHz
4	6.902 GHz
5	8.628 GHz
6	10.35 GHz
7	12.08 GHz
8	13.80 GHz
9	15.53 GHz

图 13-20　谐波与频率对应关系

（7）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，选择“anmx”和“pnmx”参数，单击>>Add>>按钮，得到如图 13-21 所示的仿真曲线。

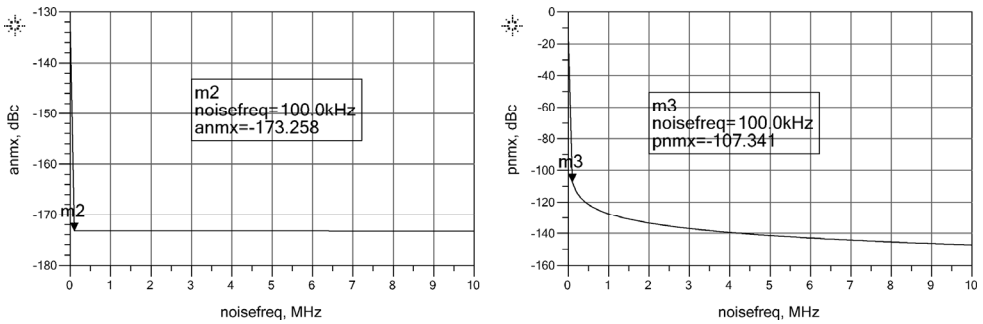


图 13-21　anmx 和 pnmx 仿真曲线

m2 表示 100kHz 的调频噪声为−173.3dBc，m3 表示 100kHz 的相位噪声为−107.3dBc。

（8）在数据窗口中加入“anmx”和“pnmx”数据列表，可以查看在各个频率上的噪声，如图 13-22 所示。

noisefreq	anmx	pnmx
1.000 Hz	-130.8 dBc	-7.842 dBc
100.0 kHz	-173.3 dBc	-107.3 dBc
200.0 kHz	-173.3 dBc	-113.4 dBc
300.0 kHz	-173.3 dBc	-116.9 dBc
400.0 kHz	-173.3 dBc	-119.4 dBc
500.0 kHz	-173.3 dBc	-121.3 dBc
600.0 kHz	-173.3 dBc	-122.9 dBc
700.0 kHz	-173.3 dBc	-124.2 dBc
800.0 kHz	-173.3 dBc	-125.4 dBc
900.0 kHz	-173.3 dBc	-126.4 dBc
1.000 MHz	-173.3 dBc	-127.3 dBc
1.100 MHz	-173.3 dBc	-128.2 dBc
1.200 MHz	-173.3 dBc	-128.9 dBc
1.300 MHz	-173.3 dBc	-129.6 dBc
1.400 MHz	-173.3 dBc	-130.3 dBc
1.500 MHz	-173.3 dBc	-130.9 dBc
1.600 MHz	-173.3 dBc	-131.4 dBc
1.700 MHz	-173.3 dBc	-132.0 dBc
1.800 MHz	-173.3 dBc	-132.4 dBc
1.900 MHz	-173.3 dBc	-132.9 dBc
2.000 MHz	-173.3 dBc	-133.4 dBc
2.100 MHz	-173.3 dBc	-133.8 dBc
2.200 MHz	-173.3 dBc	-134.2 dBc
2.300 MHz	-173.3 dBc	-134.6 dBc
2.400 MHz	-173.3 dBc	-134.9 dBc
2.500 MHz	-173.3 dBc	-135.3 dBc
2.600 MHz	-173.3 dBc	-135.6 dBc
2.700 MHz	-173.3 dBc	-136.0 dBc
2.800 MHz	-173.3 dBc	-136.3 dBc
2.900 MHz	-173.3 dBc	-136.6 dBc

图 13-22　关于 anmx 和 pnmx 数据列表

13.4.4　振荡频率线性度分析

（1）另存 xiebo 电路为 xieboxxd，双击图 13-18 中的直流电源“SRC1”，设置直流电压值“Vdc=Vtune”为一个变量，以便对它进行变量扫描。

（2）在工具栏选择0110 VAR控件，在原理图中加入变量控件，并在控件中添加变量 Vtune，默认初始值为 3.75V。

（3）双击HARMONIC BALANCE，按照图 13-23 所示修改属性。

（4）单击工具栏中的按钮，进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，添加 Vtune 信号，选中该信号，单击Trace Options...按钮，在弹出的对话框中选择“Trace Expression”项，输入表达式：plot_vs(freq[1], Vtune)，如图 13-24 所示，得到仿真曲线，如图 13-25 所示。

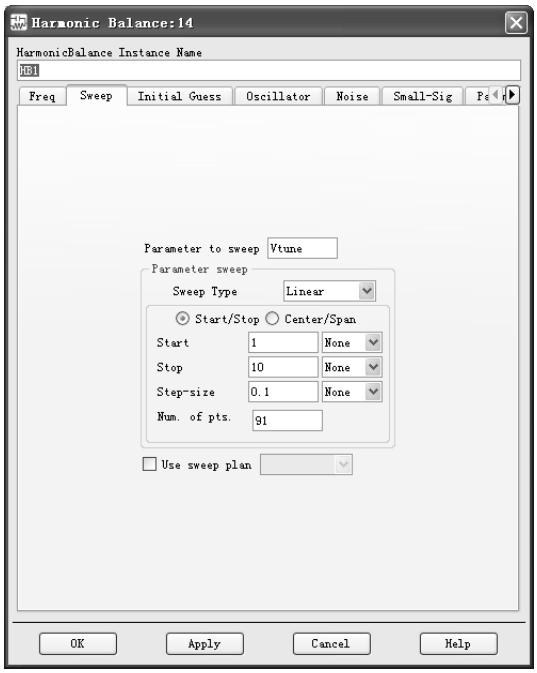


图 13-23　平衡器属性设置修改

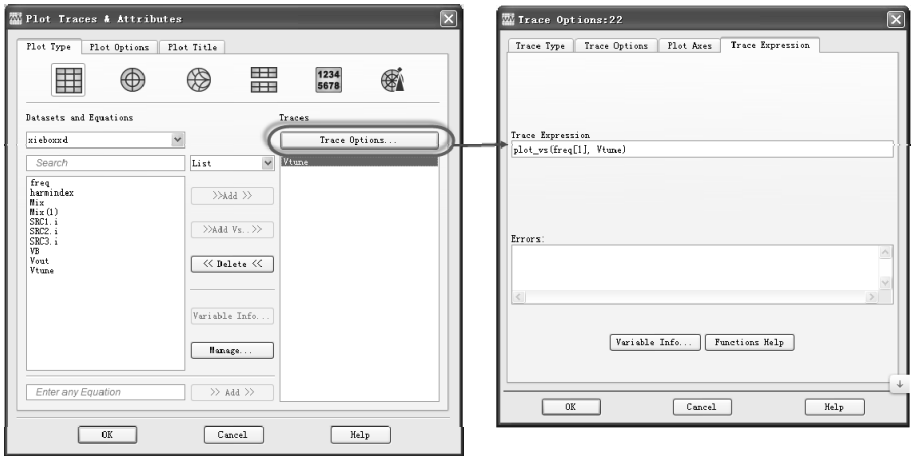


图 13-24　绘制图形设置窗口

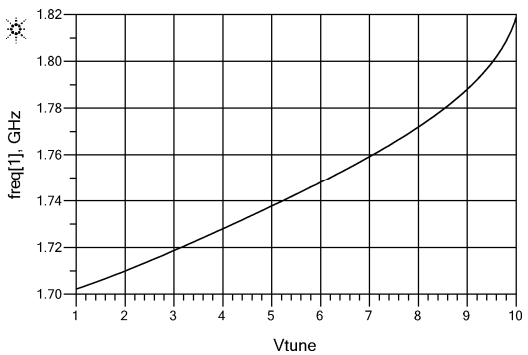


图 13-25　输出电压与频率之间的关系

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出窗口，在对话框里编辑公式为

Eqn powerflatness=vs(dBm(Vout[1]),freq[1]/1e9)

它表示输出功率与频率之间的关系，如图 13-26 所示。从图中可以看出输出功率变化范围平坦。

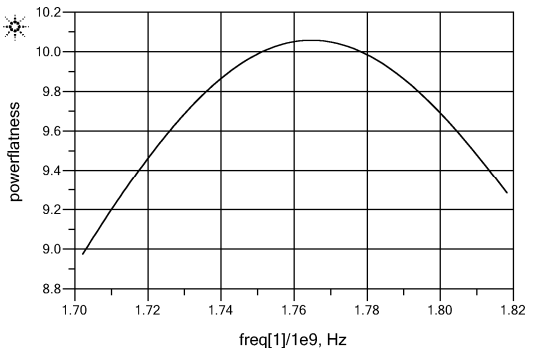


图 13-26　输出功率与频率之间的关系

13.5　思考题

（1）改变振荡器直流偏置的条件，分析不同的直流偏置电阻对振荡器工作的影响。

（2）VCO 的频率稳定度和频谱纯度由哪几个因素决定？如何在 ADS 中进行仿真？

第 14 章　微带天线的设计与仿真

天线是无线电设备的重要组成部分，其主要功能是将电磁波发射至空气中或从空气中接收电磁波，所以天线亦可视为射频收发电路与空气的信号耦合器。天线性能的好坏直接影响无线电设备的性能。微带天线是近 30 年来逐渐发展起来的一类新型天线，因其具有体积小、重量轻、结构简单等优点而被广泛用于微波通信接收系统及测量领域中。

本章利用 ADS2012 设计中心频率为 3.0GHz 的矩形微带天线。对原理图参数和版图进行优化仿真，对阻抗匹配电路设计进行了详细的论述。仿真优化的结果表明该矩形微带天线的辐射特性基本符合设计要求。

14.1　微带天线的基础知识

早在 1953 年就提出了微带天线的概念，但并未引起工程界的重视。在 20 世纪 50 年代和 60 年代只有一些零星的研究，真正的发展和使用是在 70 年代。常用的一类微带天线是在一个薄介质基板（如聚四氟乙烯玻璃纤维压层）上，一面附上金属薄层作为接地板，另一面用光刻腐蚀等方法做出一定形状的金属贴片，利用微带线和轴线探针对贴片馈电，这就构成了微带天线，如图 14-1 所示。

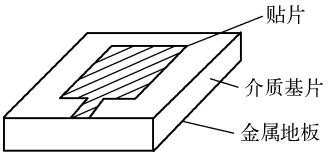


图 14-1　微带天线结构图

按结构特征把微带天线分为两大类，即微带贴片天线和微带缝隙天线；按形状分类，可分为矩形、圆形、环形微带天线等。按工作原理分类，无论哪一种天线都可分成谐振型（驻波型）和非谐振型（行波型）微带天线。前一类天线有特定的谐振尺寸，一般只能工作在谐振频率附近；而后一类天线无谐振尺寸的限制，它的末端要加匹配负载以保证传输行波。

与普通微波天线相比，微带天线有如下优点：

☺ 剖面薄，体积小，重量轻；

☺ 具有平面结构，并可制成与导弹、卫星等载体表面共形的结构；

☺ 馈电网络可与天线结构一起制成，适合于用印刷电路技术大批量生产；

☺ 能与有源器件和电路集成为单一的模块；

☺ 便于获得圆极化，容易实现双频段、双极化等多功能工作。

微带天线的主要缺点是：

☺ 频带窄；

☺ 有导体和介质损耗，并且会激励表面波，导致辐射效率降低；

☺ 功率容量较小，一般用于中、小功率场合；

☺ 性能受基片材料影响大。

不过，已发展了不少技术来克服或减小上述缺点的影响。例如，已有多种途径来展宽微带天线的频带。常规设计的相对带宽约为中心频率的 1%～6%；新一代设计的典型值为 15%～20%，也已制成超宽频带微带天线。当然，这一性能的改进往往以某些其他特性的牺牲（如体积增大）作为代价。

微带天线现已应用于 100MHz～100GHz 的宽广频域上的大量无线电设备中，特别是在飞行器上和地面便携式设备中。在要求低剖面辐射器的场合，即使微带天线某些性能不如常规天线，也往往被优先选用。随着微带天线材料、设计和加工工艺的不断发展，其应用正在与日俱增。微带天线将能替代不少常规天线，而成为一些民用和军事装备，特别是便携式设备的更新换代产品。

14.2　矩形微带天线

通常把贴片形状为矩形的微带天线，称作矩形微带天线。常用的矩形微带天线的分析设计方法有传输模法和谐振模法。传输模法的思路是把矩形块等效为辐射阻抗加载的一段很宽的微带线，由于设计公式近似且需要实验调整，这种方法是不准确的。谐振模法是把微带天线看成具有碰壁的封闭腔体，这种方法精度好，但设计成本高。

1．工程设计方法

工程上，微带天线用传输模式近似设计，很宽的微带线沿横向是谐振的，在贴片下面电场沿谐振长度正弦变化，假定电场沿宽带 W 方向不变化，并且天线的辐射是宽边的边沿。

辐射边沿可以看作用微带传输线连接起来的辐射槽，如图 14-2 所示，单个辐射槽的辐射电导为

$$G=\begin{cases}\dfrac{W^2}{90\lambda_0^2} & W\leqslant\lambda_0\\[2ex] \dfrac{W^2}{120\lambda_0^2} & W>\lambda_0\end{cases} \tag{14-1}$$

单个辐射槽的辐射电纳为

$$B=\frac{k_0\Delta L\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{e}}}}{Z_0} \tag{14-2}$$

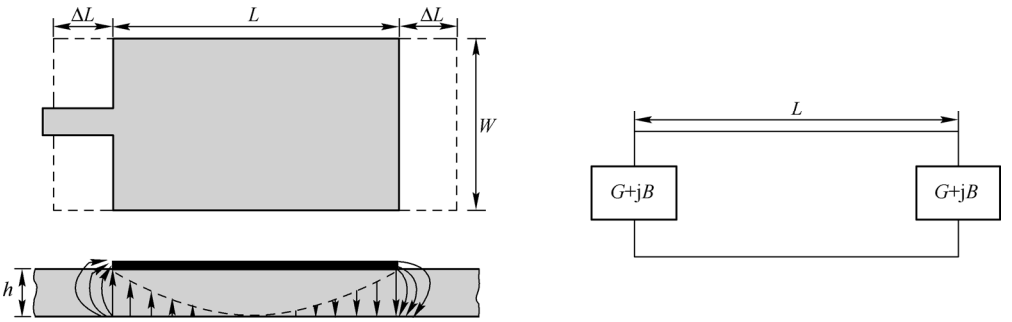
式中

$$Z_0=\frac{120\pi h}{W\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{e}}}} \tag{14-3}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{e}}=\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}+1}{2}+\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}-1}{2}\left(1+\frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \tag{14-4}$$

$$\Delta L = 0.412h\frac{\varepsilon_e + 0.3}{\varepsilon_e - 0.258}\frac{(W/h)+0.264}{(W/h)+0.8} \tag{14-5}$$

$k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 是自由空间的波数，Z_0 是宽度 W 的微带特性阻抗，ε_e 是有效介电常数，ΔL 是边沿电容引起的边沿延伸。由图 14-2 可以看出，边沿电场盖住了微带边沿，等效为贴片电长度增加。



（a）结构图　　（b）等效电路图

图 14-2　传输模法

为了计算天线的辐射阻抗，天线可以等效为槽阻抗与传输线级联。输入导纳为

$$Y_{in} = Y_s + Y_0\frac{Y_s + jY_0\tan\beta(L+2\Delta L)}{Y_0 + jY_s\tan\beta(L+2\Delta L)} \tag{14-6}$$

式中，$Y_s = G + jB$；$\beta = 2\pi\sqrt{\varepsilon_e}/\lambda_0$，为微带线内传输常数。

谐振时，
$$L + 2\Delta L = \lambda_g/2 = \lambda_0/2\sqrt{\varepsilon_e} \tag{14-7}$$

式（14-6）仅剩两个电导，即

$$Y_{in} = 2G$$

微带天线的工作频率与结构参数的关系为

$$f_0 = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_e}(L+2\Delta L)} \tag{14-8}$$

W 不是很关键，通常按照下式确定：

$$W = \frac{c}{2f_0}\left(\frac{2}{\varepsilon_r + 1}\right)^{1/2} \tag{14-9}$$

2．主要技术指标

描述微带天线能量转换和方向特性的电参数有许多，诸如输入阻抗、辐射电阻、方向图、方向系数、增益、效率、频带特性、极化特性等。

微带天线的电参数取决于天线的形式和工作频率，根据一定的天线结构和工作频率计算其电参数称为天线分析。根据用途和工作频率对天线电参数提出的要求设计天线形式称为天线设计或天线综合。

【增益 *G*】

$$G = \frac{P_r}{P_i} \tag{14-10}$$

式中，P_r 为被测天线距离 R 处所接收到的功率密度；P_i 为全向天线距离 R 处所接收到的功率密度。增益是表示天线方向性好坏的重要指标。

【输入阻抗 Z_{in}】

$$Z_{in}=\frac{U}{I} \tag{14-11}$$

式中，U 为在馈入点上的射频电压；I 为在馈入点上的射频电流。

【驻波比 VSWR】天线是个单口网络，输入驻波比或反射系数是一个基本指标，为了使天线辐射尽可能多的功率，必须使天线与空气匹配，输入驻波比尽可能小。阻抗、驻波比与反射系数的关系为

$$\left.\begin{aligned}\mathrm{VSWR}&=\frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}\\ Z_{in}&=Z_0\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\end{aligned}\right\} \tag{14-12}$$

【辐射效率 η_r】

$$\eta_r=\frac{P_r}{P_i} \tag{14-13}$$

式中，P_r 为天线辐射出的功率；P_i 为馈入天线的功率。

【旁瓣】在主辐射波旁边还有许多旁瓣，沿角度方向展开如图 14-3 所示。其中，HPBW 为半功率波束宽度，为辐射最大功率下降 3dB 时的角度；FNBW 为第一零点波束宽度；SLL 为旁瓣高度，是辐射最大功率与最大旁瓣的差。

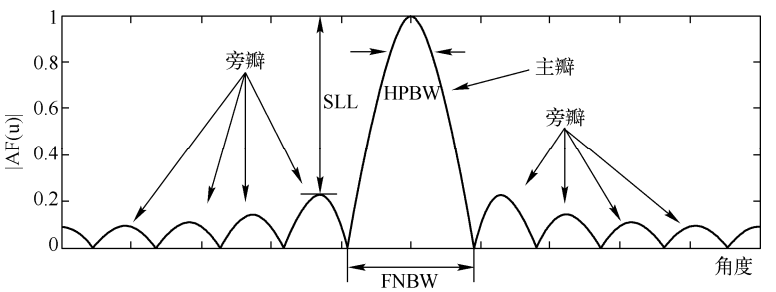


图 14-3　主瓣与旁瓣

14.3　矩形微带天线设计

用陶瓷基片 ε_r=9.8，厚度 h=1.27mm，设计在 3GHz 附近工作的矩形微带天线，输入阻抗为 50Ω。

14.3.1　几何参数计算

根据式（14-8）、式（14-4）、式（14-5）、式（14-9）计算矩形天线的几何参数。

$$W=\frac{c}{2f_0}\left(\frac{\varepsilon_r+1}{2}\right)^{-1/2}=21.5\text{mm}$$

$$\varepsilon_e=\frac{\varepsilon_r+1}{2}+\frac{\varepsilon_r-1}{2}\left(1+\frac{12h}{W}\right)^{-1/2}=8.77$$

$$\Delta L=0.412h\frac{\varepsilon_e+0.3}{\varepsilon_e-0.258}\frac{(W/h)+0.264}{(W/h)+0.8}=0.541\text{mm}$$

$$L=\frac{c}{2f_0\sqrt{\varepsilon_e}}=-2\Delta L=15.81\text{mm}$$

馈线的宽度可以由 ADS2012 自带工具 LineCalc 软件计算，如图 14-4 所示。

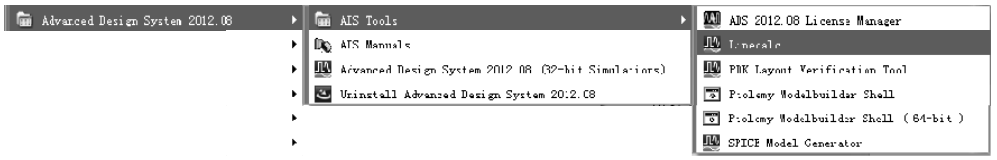


图 14-4　LineCalc 软件启动

（1）启动后，跳出主界面，如图 14-5 所示。

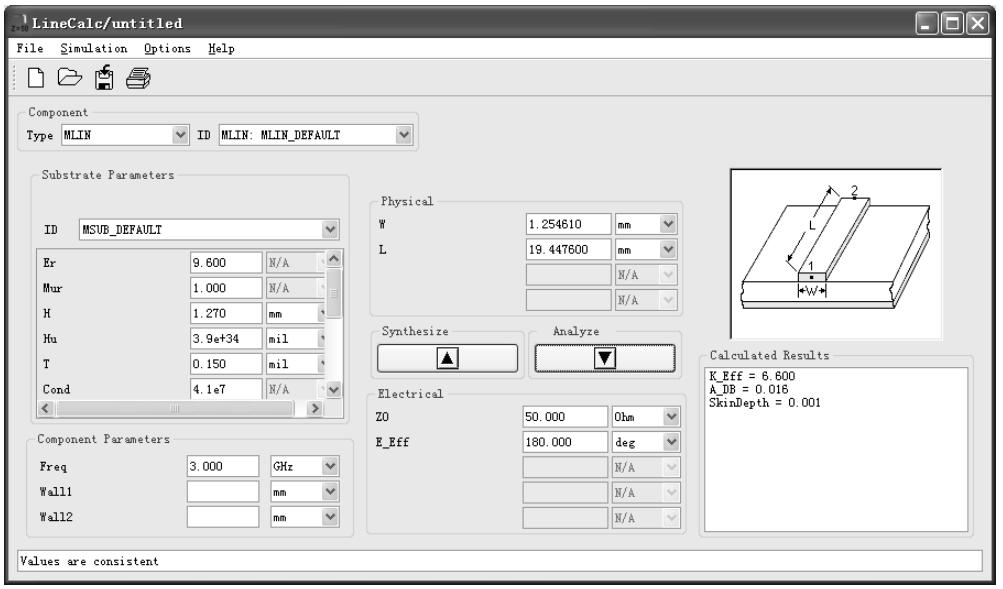


图 14-5　LineCalc 主界面

（2）在“Component”栏“Type”项中选取“MLIN”，在“Substrate Parameters”栏设置介质基板的参数，在“Component Parameters”栏输入该微带线的工作频率，在“Electrical”栏设置输入阻抗为 50Ω，相位变化 180°，如图 14-5 所示。

（3）单击“Synthesize”下边的▲按钮，出现计算状态窗口，如图 14-6 所示。若前边设置有误，在计算过程中会出现错误信息提示。

（4）计算结束后，在主界面“Physical”栏中出现计算结果。

> 馈线宽度为 1.23mm，长度为 19.27mm。在实际设计过程中，涉及阻抗匹配过程，故长度可以任意选取，由于长度过长会影响天线辐射性能，所以选取 3mm。

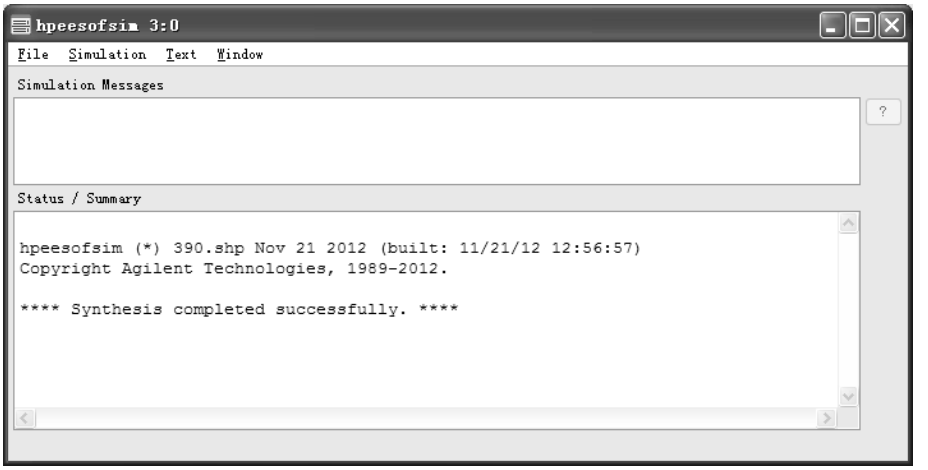


图 14-6　计算状态窗口

14.3.2　版图初步仿真

（1）进入 ADS 后，创建新工程，命名为 chapter14_wrk。

（2）单击按钮，命名为 layout1，创建 layout 文件，如图 14-7 所示。

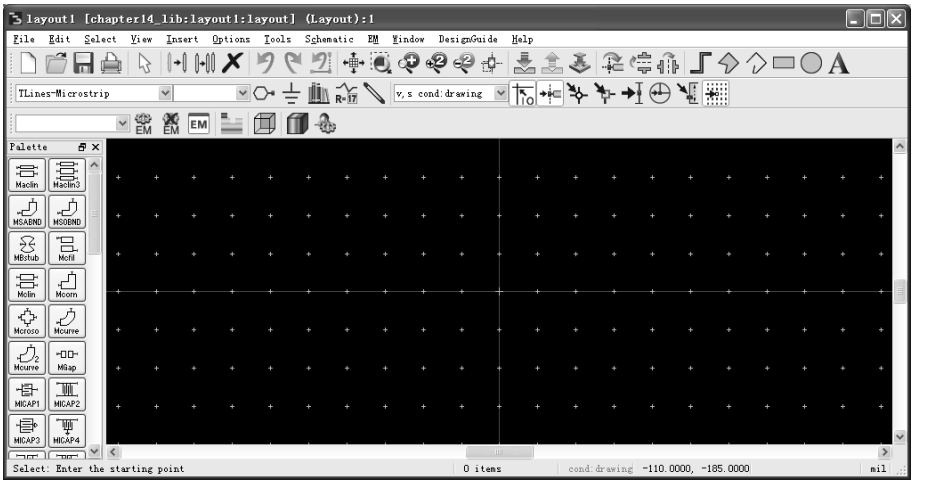


图 14-7　Layout 仿真主界面

（3）单击鼠标右键→【Preferences…】→【Units/Scale】，设定度量单位为 mm。一般在 ADS2012 中，度量单位的默认值为 mil，如图 14-8 所示。

（4）在“TLines-Microstrip”类中选择控件，按照上面计算的几何参数，绘制版图。单击按钮，在馈线端加入端口，如图 14-9 所示。

（5）单击图标，版图所有的设置都包含在该栏下，如图 14-10 所示。从图中可以看出，图中不符合设置的地方后面标记状态。

（6）在图 14-10 中单击 Substrate，弹出新的对话菜单，单击 New... 按钮，弹出对话框，新建 Substrate，输入“File Name”为 layout1，如图 14-11 所示。

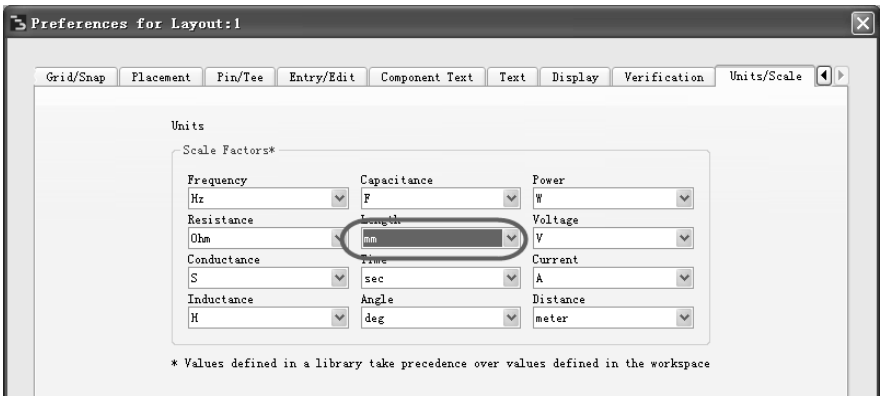


图 14-8　修改单位设置

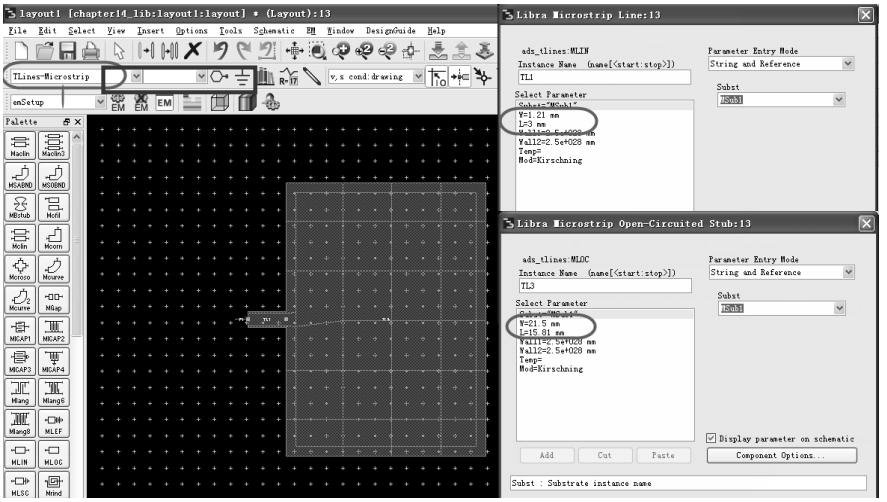


图 14-9　矩形微带天线版图

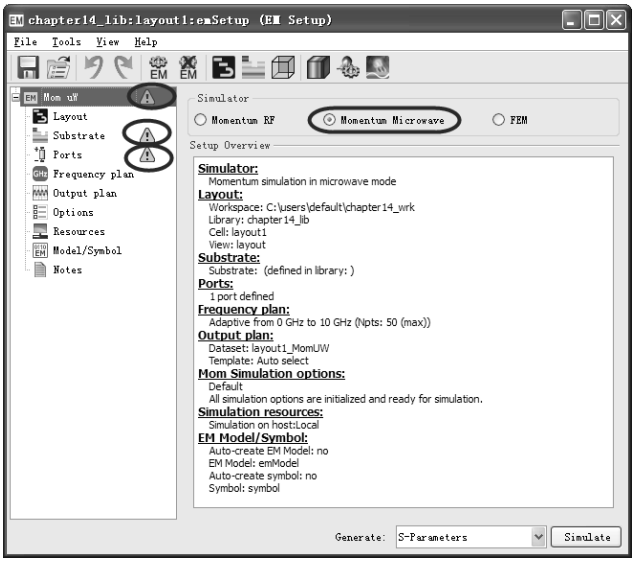


图 14-10　EM 设置

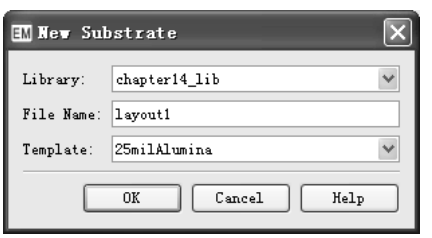


图 14-11　新建 Substrate

（7）单击 OK 按钮，在“Substrate”栏目下显示 chapter14_lib:layout1，如图 14-12 所示。

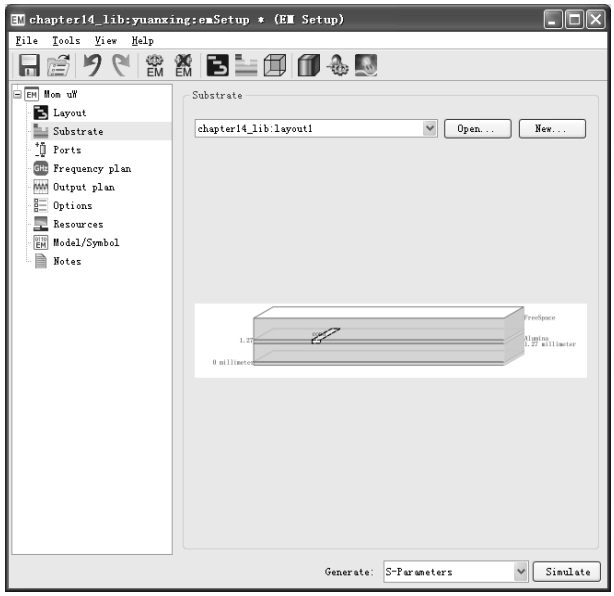


图 14-12　在“Substrate”栏目下显示 chapter14_lib:layout1

（8）单击图 14-12 中的 Open... 按钮，进行 Substrate 设置。单击图 14-13 中各个层，可以完成相关参数的设置，如图 14-13 所示，其中微带线板厚度为 0.018mm。

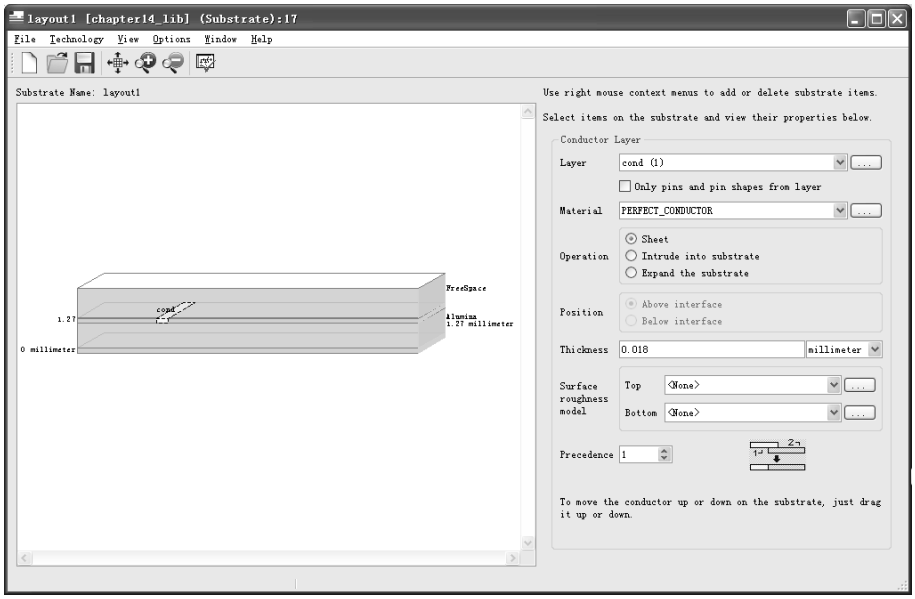


图 14-13　进行 Substrate 设置

（9）单击 Frequency plan 图标，进行 S-parameter 设置，弹出仿真设置窗口，该窗口右侧的“Type”选择“Linear”，“Fstart”、“Fstop”分别选为 2.5GHz、3.5GHz，“Step”选为 0.05GHz，如图 14-14 所示。

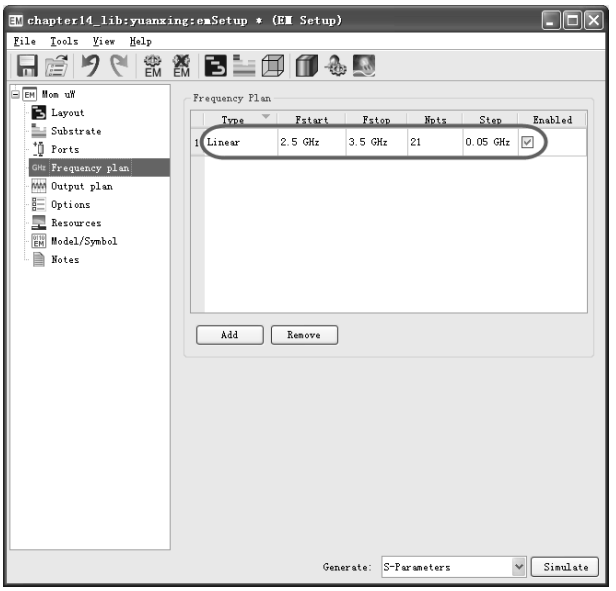


图 14-14　进行 S-parameter 设置

（10）单击按钮，开始仿真，如图 14-15 所示。由图 14-15 可见，理论上的计算结果与实际的符合还是相当不错的，中心频率大约在 3.0GHz 左右。中心频率处反射系数 S11 比较大，匹配不理想。

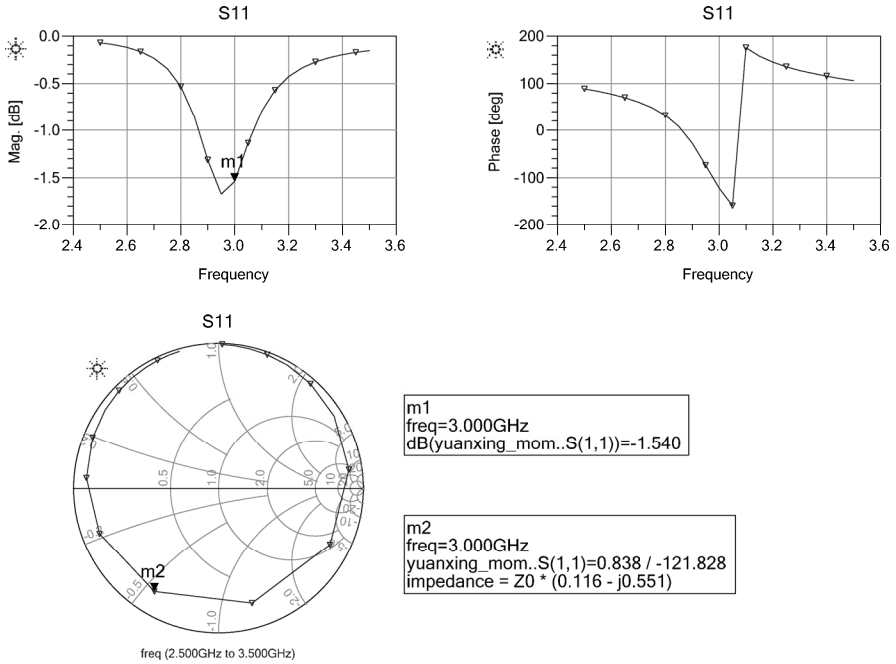


图 14-15　初步仿真曲线

在 3GHz 处，m2 距离圆图上的坐标原点还有相当的距离。输入阻抗为 $Z_0\times$（0.116−j0.551）=5.8−j27.55Ω。为了进一步减小反射系数，达到较理想的匹配，并且使中心频率更加精确，可以在原理图中进行匹配。

14.3.3　匹配优化设计

天线在 3GHz 下的输入阻抗是 $Z_0\times(0.116-j0.551)=5.8-j27.55\ \Omega$，可以等效为一个电阻（R）和电容（C）的串联。根据电路知识，R=5.8Ω，C=1.9pF。

匹配的原理是：在天线信号输入端，串联一根 50Ω 传输线，使得 S11 参数在等反射系数圆上旋转，到达 g=1 的等电导圆上，然后再并联一根 50Ω传输线，将 S11 参数转移到接近 0 处。所需要计算的就是串联传输线和并联传输线的长度。利用 ADS2012 原理图的优化功能完成匹配。

（1）单击按钮，新建原理图文件。在“Tlines-Microstrip”类中，选择控件，双击编辑属性，如图 14-16 所示。这是微带线基板的参数设置。选择、控件放置到原理图中。其中“MLOC”表示短路微带线。在“Lumped-Components”类中，选择、控件放置到原理图中。在“Simulation-S_Param”类中，把仿真器和“Term”放置到原理图合适位置，单击图标，放置两个地，双击，修改属性，要求扫描频率从 1GHz 到 4GHz，步长为 0.1GHz。微带天线等效电路如图 14-16 所示。

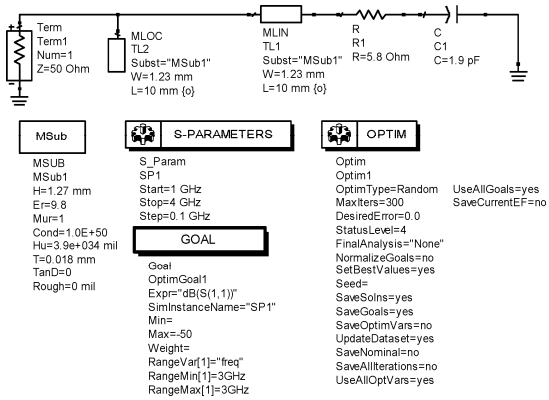


图 14-16　微带天线优化匹配电路图

> 由于 TL1、TL2 的特性阻抗为 50Ω，则其宽度 W 为 1.23mm。

（2）其中 TL1 和 TL2 的 L 是待优化的参量，初值取 10mm，优化范围是 1～20mm。其设置方式如图 14-17 所示。

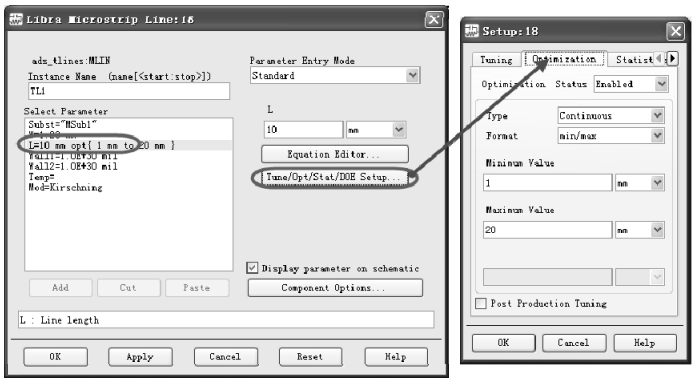


图 14-17　优化参量的设置

（3）选择“Optim/Stat/Yield/DOE”类，插入Goal控件。其中 Goal 参数设置 dB（S（1，1））最大值为−50dB，因为在原理图中的仿真要比在 Layout 中的仿真理想得多，所以要求设置得比较高，以期在 Layout 中有更好的仿真曲线。

（4）选择 OPTIM控件，优化方法设置为 Random，优化次数可以选得大些，这里设为 300。其他参数设为默认。得到等效电路，如图 14−18 所示。

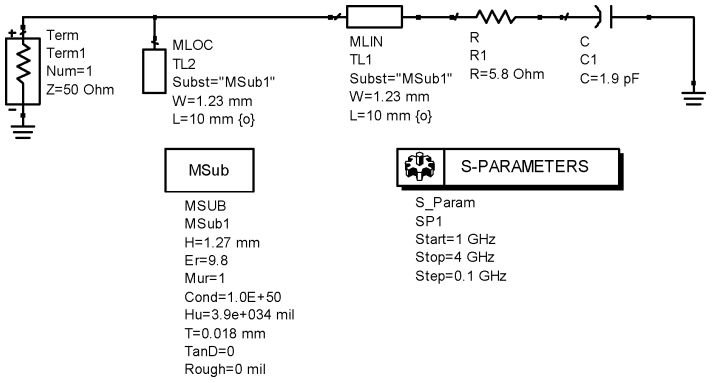


图 14−18　微带天线等效电路

（5）单击工具栏中的按钮进行优化仿真，如图 14−19 所示。

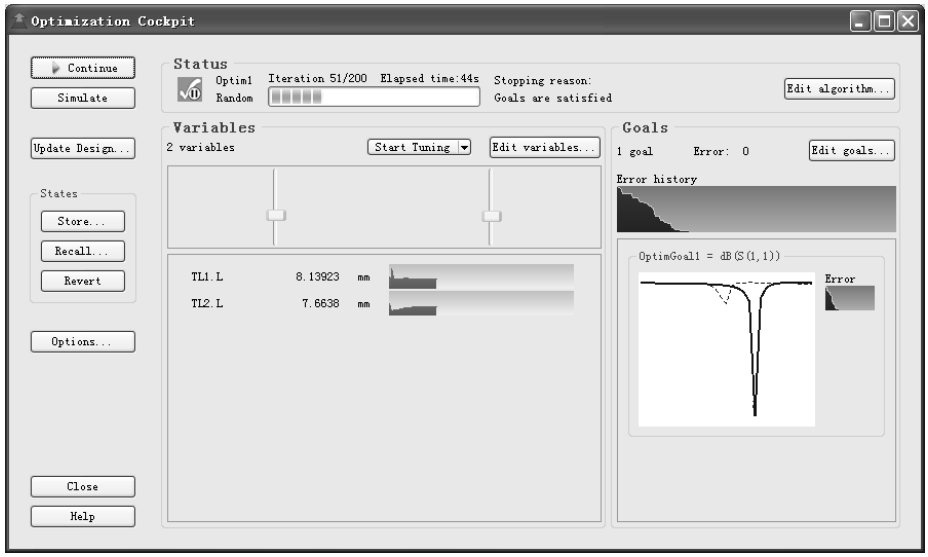


图 14−19　优化界面图

（6）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后会出现图形显示窗口。

（7）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择 S(1,1)，即 S11 参数，单击 >>Add>> 按钮，弹出设置单位窗口（这里选择 dB），单击两次 OK 按钮后，数据窗口中显示出 S11 随频率变化的曲线，如图 14−20 所示。

从图中 m1 数据可以看出中心频率 3GHz 的 S11 参数已经达到−50.789，m2 在阻抗圆图上接近圆心，输入阻抗基本匹配。

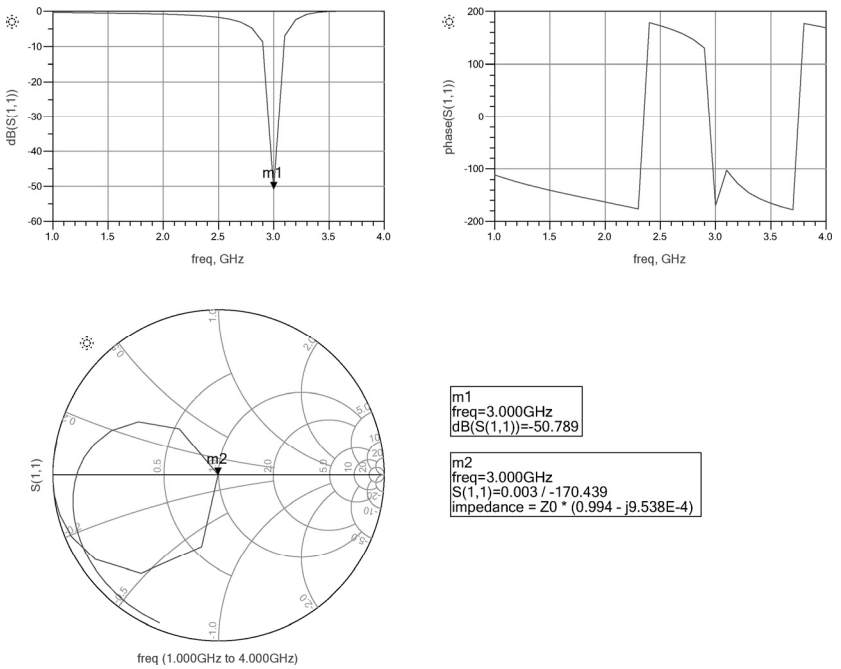


图 14-20　优化仿真曲线

14.3.4　版图仿真

（1）参照原理图优化仿真，计算出来的优化结果，修改 Layout 图，如图 14-21 所示。

（2）单击 EM 图标，弹出仿真设置窗口，该窗口右侧的“Type”选择“Linear”，“Fstart”、“Fstop”分别选为 2.5GHz、3.5GHz，“Step”选为 0.05GHz。单击 Simulate 按钮进行仿真，如图 14-22 所示。

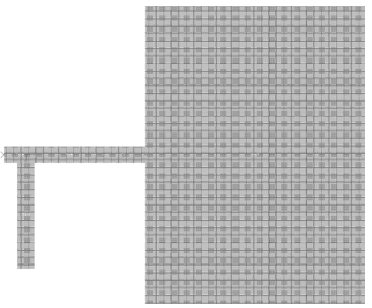


图 14-21　优化匹配后的 Layout 图

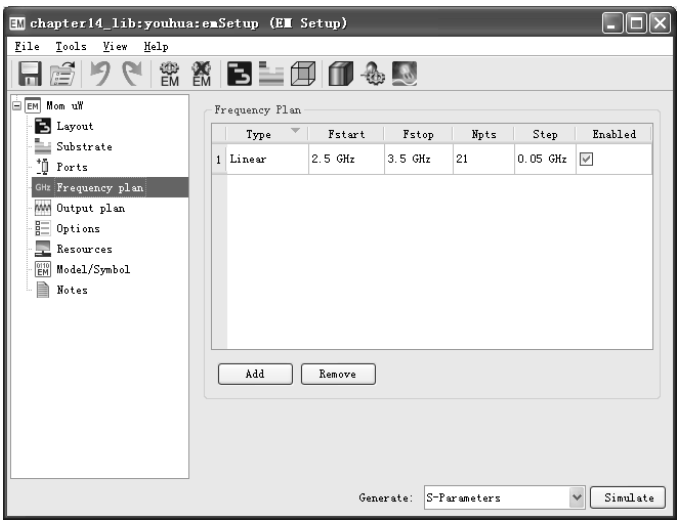


图 14-22　仿真设置

（3）仿真结束后，得到优化仿真波形，如图 14-23 所示。

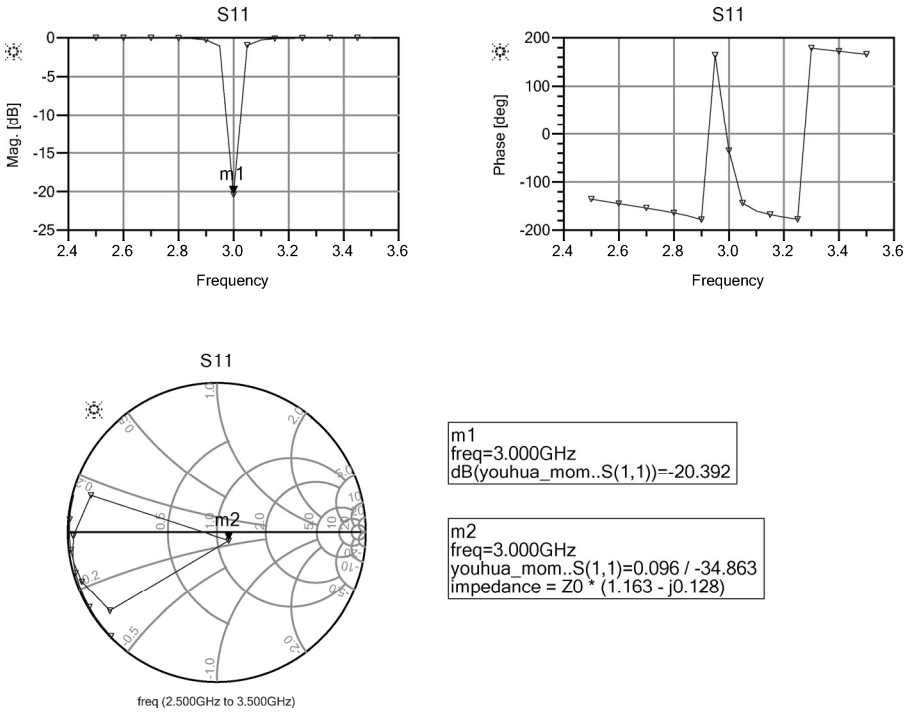


图 14-23　优化后仿真图

> 在版图初步仿真中，天线端口处有 3mm 的微带线，在此处不可忽略。

由于这里是手工布板，而不是由原理图自动生成的，传输线的长度可能需要稍作调整（但不超过 1mm）。为了方便输入，在电路的左端加了一段 50Ω的传输线。其长度对最终仿真 S11 的幅值影响微乎其微，但其对相位的影响很大。在不严格考虑相位变化时，该长度可以任意取，这里取 1mm。从图 14-23 可以看出该天线基本满足设计要求。

14.4　思考题

（1）本例输入阻抗匹配采用并联单支节匹配，可否采用其他匹配方法？如果可以，请读者自行设计优化匹配电路。

（2）如何显示天线的方向图、增益、辐射效率等参数的仿真曲线？

（3）如果天线中心频率升高，Layout 仿真的精确程度会不会受到影响？请读者自行验证。

（4）请读者查阅相关资料，了解微带天线在制作和测试过程中应注意的问题。

第 15 章　印刷偶极子天线的设计与仿真

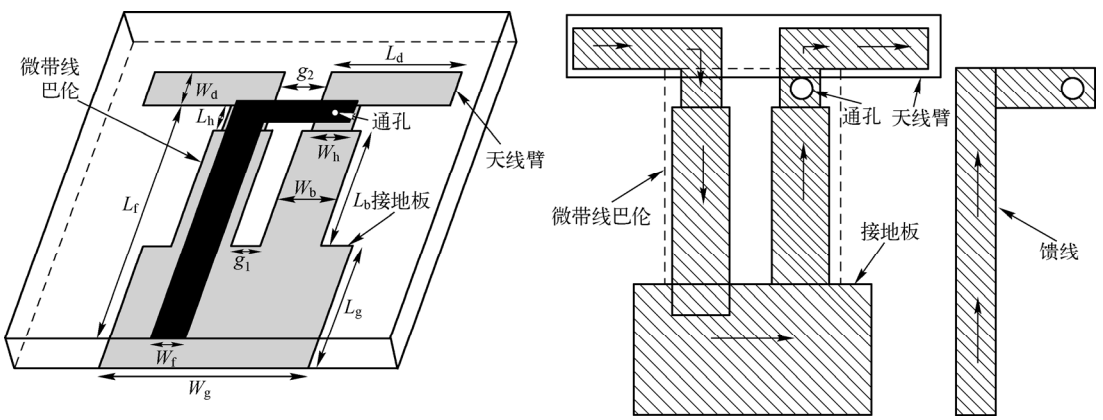
偶极子天线是一种最基本的单天线形式，既可以独立使用，也可以作为大型天线阵的辐射单元。采用微带平衡巴伦馈电的印刷偶极子天线具有体积小、重量轻、制造成本低、易于大规模集成等特点，克服了常规微带天线频带较窄等特点，在驻波比小于 2 的约束下，带宽可大于 40%。传统的印刷偶极子天线采用微带线馈电、单面辐射振子的形式，具有较宽的带宽，但其微带馈电网络损耗较大，且受外界电磁环境影响较大。

本章利用 ADS Layout 设计环境对 1.8GHz 印刷偶极子天线进行设计与仿真，特别是 2D 和 3D 参数的绘制，为读者学习天线设计提供技术支持。

15.1　印刷偶极子天线简介

1．天线结构

印刷偶极子天线结构如图 15-1 所示。其中，箭头的方向表示电流的流向。基本工作原理是微波信号通过巴伦馈电，从微带线耦合到振子贴片上，再由振子臂辐射到自由空间。



（a）平面图　　（b）结构图

图 15-1　印刷偶极子天线结构图

2．技术指标

☺ 谐振频率为 1.8GHz;
☺ 相对带宽约为 24%;
☺ 反射损耗（反射系数）小于 2.0dB;
☺ 反射波损耗小于−28dB;

☺ 输入阻抗为 50Ω;

☺ 增益为 2.0dB。

☺ 天线尺寸见表 15-1。

表 15-1　1.8GHz 印刷偶极子天线的尺寸

偶极子天线臂	L_d=29mm　W_d=6mm　g_2=3mm
微带巴伦	L_b=25mm　L_h=3mm　g_1=1mm　W_f=3mm　W_b=5mm　W_h=3mm
通孔	r=0.4mm
地板	L_g=12mm　W_g=19mm

15.2　设计过程

15.2.1　天线模型建立

（1）单击【File】→【New Project】设置工程文件名称及存储路径，直接在主窗口中单击，打开 Layout 窗口。

（2）单击鼠标右键，从弹出的快捷菜单中选择【Preferences…】弹出属性设置窗口。单击“Units/Scale”选项卡选择“Length”项为“mm”，如图 15-2 所示。

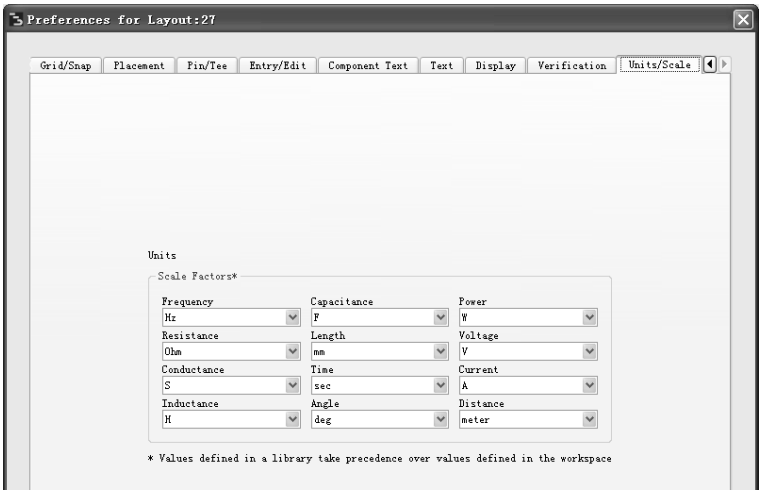


图 15-2　单位设定

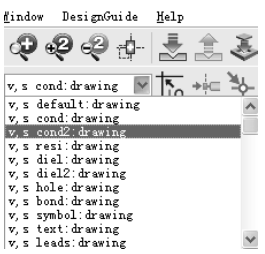


图 15-3　设计层选择

（3）由于设计的是双面天线，在一个介质板上贴有上下两层，上层为馈线，下层为偶极子天线和地板。首先设计底层，选择“v,s cond2：drawing”，如图 15-3 所示。

（4）在工具栏选择，然后在窗口中选择一点，开始绘制矩形，矩形大小的控制可以看右下角坐标，它表示相对距离。双击元件修改尺寸，图的右侧显示出该模型尺寸，如图 15-4 所示设计底板尺寸。

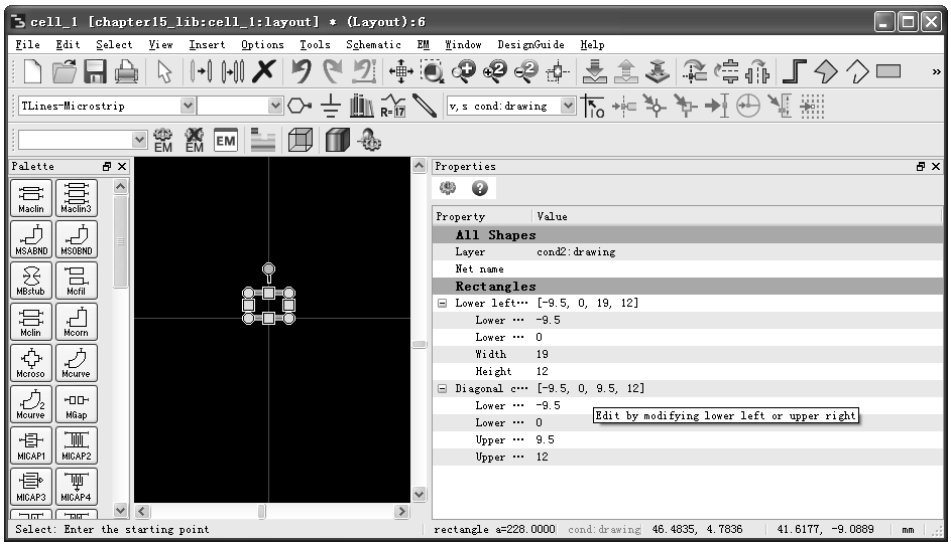


图 15-4　尺寸设计

（5）同理按要求尺寸设计天线其他部分，得到如图 15-5 所示的面天线图形。

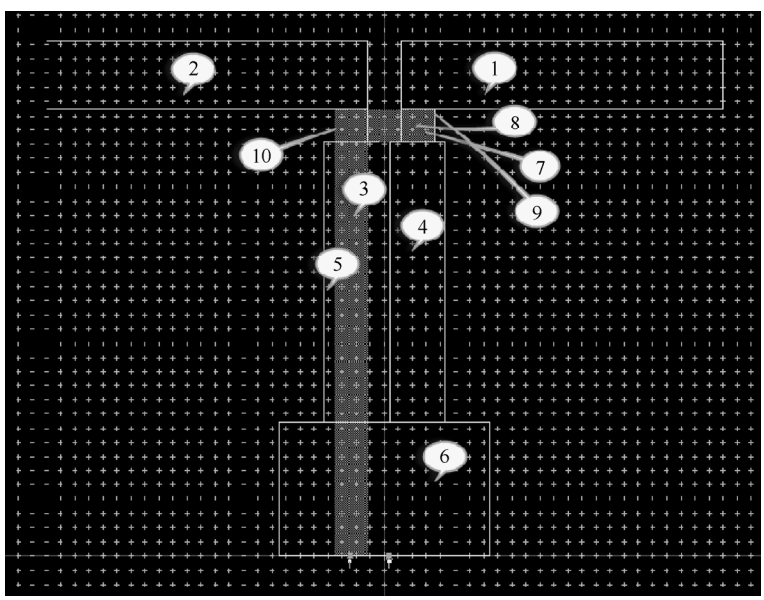


图 15-5　面天线图形

图 15-5 中标注的序号对应天线各部分尺寸及绘制层如图 15-6 所示（在绘制过程中注意图层的选择）。

15.2.2　优化仿真

（1）选择工具栏中的控件加端口。第一个端口加在 cond 上，第二个端口加在 cond2 上。得到在 Layout 中设计的天线全貌，如图 15-7 所示。

（2）单击 EM 按钮，进行相关参数设置，如图 15-8 所示。

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[1.5, 40, 29, 6]
Lower …	1.5
Lower …	40
Width	29
Height	6
Diagonal c…	[1.5, 40, 30.5, 46]
Lower …	1.5
Lower …	40
Upper …	30.5
Upper …	46

(a)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[-30.5, 40, 29, 6]
Lower …	-30.5
Lower …	40
Width	29
Height	6
Diagonal c…	[-30.5, 40, -1.5, 46]
Lower …	-30.5
Lower …	40
Upper …	-1.5
Upper …	46

(b)

All Shapes	
Layer	cond:drawing
Net name	N__0
Rectangles	
Lower left…	[-4.5, 0, 3, 40]
Lower …	-4.5
Lower …	0
Width	3
Height	40
Diagonal c…	[-4.5, 0, -1.5, 40]
Lower …	-4.5
Lower …	0
Upper …	-1.5
Upper …	40

(c)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[0.5, 12, 5, 25]
Lower …	0.5
Lower …	12
Width	5
Height	25
Diagonal c…	[0.5, 12, 5.5, 37]
Lower …	0.5
Lower …	12
Upper …	5.5
Upper …	37

(d)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[-5.5, 12, 5, 25]
Lower …	-5.5
Lower …	12
Width	5
Height	25
Diagonal c…	[-5.5, 12, -0.5, 37]
Lower …	-5.5
Lower …	12
Upper …	-0.5
Upper …	37

(e)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[-9.5, 0, 19, 12]
Lower …	-9.5
Lower …	0
Width	19
Height	12
Diagonal c…	[-9.5, 0, 9.5, 12]
Lower …	-9.5
Lower …	0
Upper …	9.5
Upper …	12

(f)

All Shapes	
Layer	cond:drawing
Net name	N__0
Rectangles	
Lower left…	[-1.5, 37, 6, 3]
Lower …	-1.5
Lower …	37
Width	6
Height	3
Diagonal c…	[-1.5, 37, 4.5, 40]
Lower …	-1.5
Lower …	37
Upper …	4.5
Upper …	40

(g)

All Shapes	
Layer	hole:drawing
Net name	
Circles	
Center poi…	3
Center poi…	38.5
Edit mode	Absolute radius
Radius	0.4
Arcs and Circles	
Resolution…	0

(h)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[1.5, 37, 3, 3]
Lower …	1.5
Lower …	37
Width	3
Height	3
Diagonal c…	[1.5, 37, 4.5, 40]
Lower …	1.5
Lower …	37
Upper …	4.5
Upper …	40

(i)

All Shapes	
Layer	cond2:drawing
Net name	N__1
Rectangles	
Lower left…	[-4.5, 37, 3, 3]
Lower …	-4.5
Lower …	37
Width	3
Height	3
Diagonal c…	[-4.5, 37, -1.5, 40]
Lower …	-4.5
Lower …	37
Upper …	-1.5
Upper …	40

(j)

图 15-6　天线尺寸及对应图层

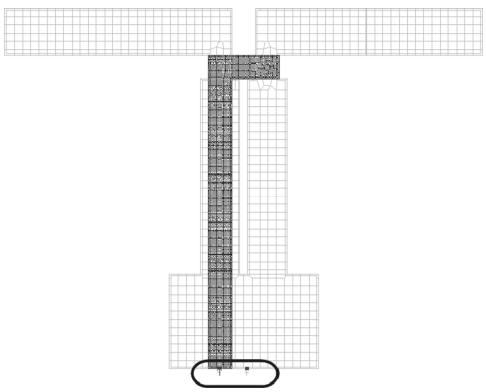


图 15-7　端口设置

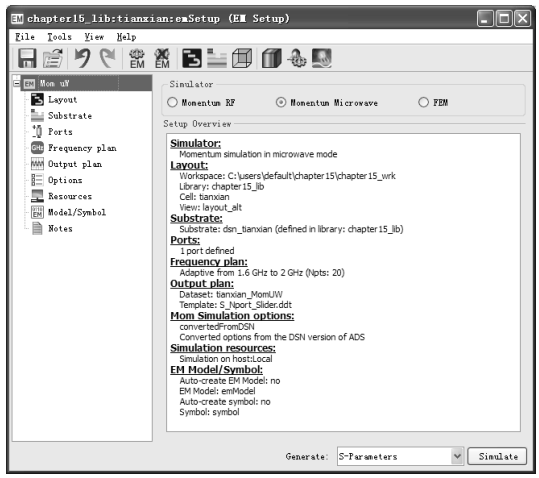
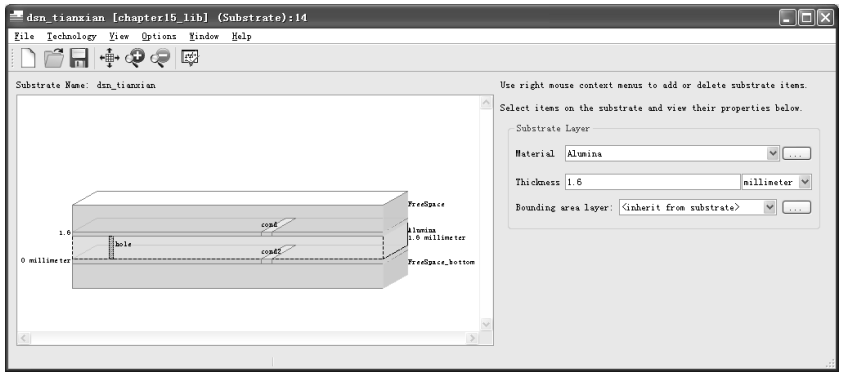
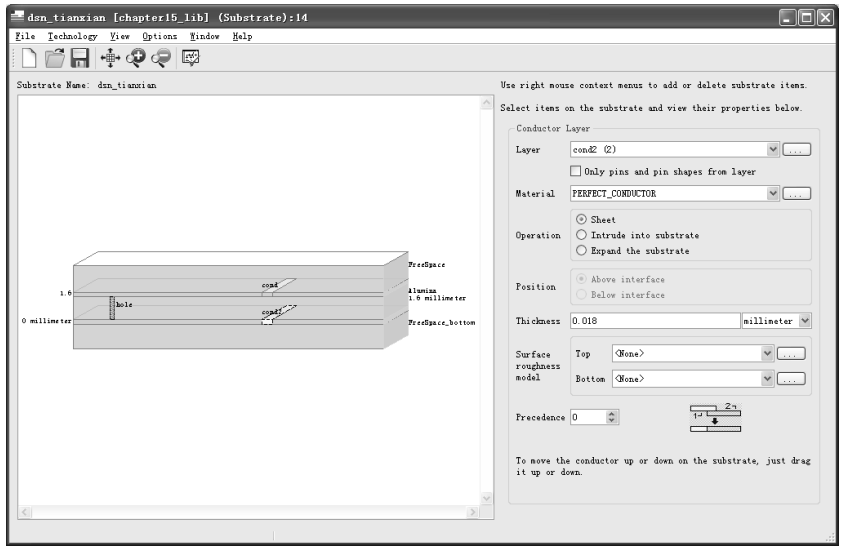


图 15-8　EM 设置界面

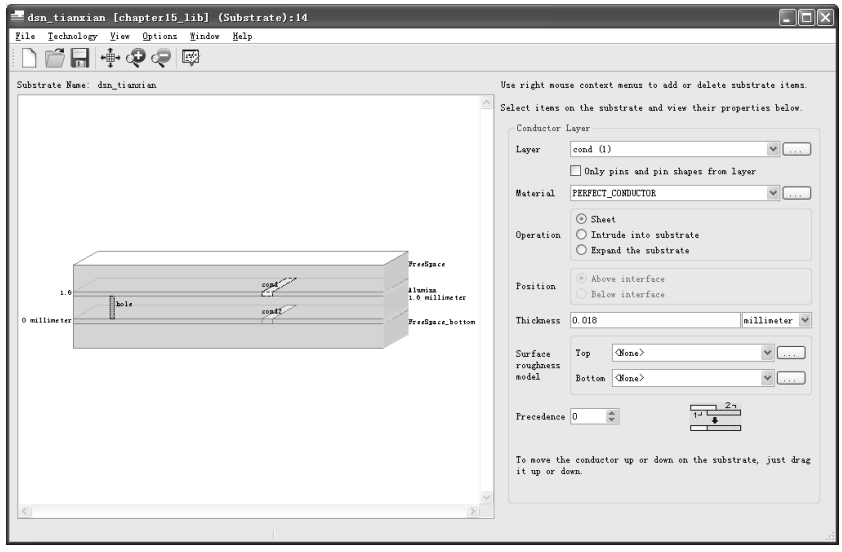
（3）新建 Substrate，完成层相关参数的设置，如图 15-9 所示。



（a）



（b）



（c）

图 15-9　层相关参数设置

（4）S 参数仿真设置，如图 15-10 所示。

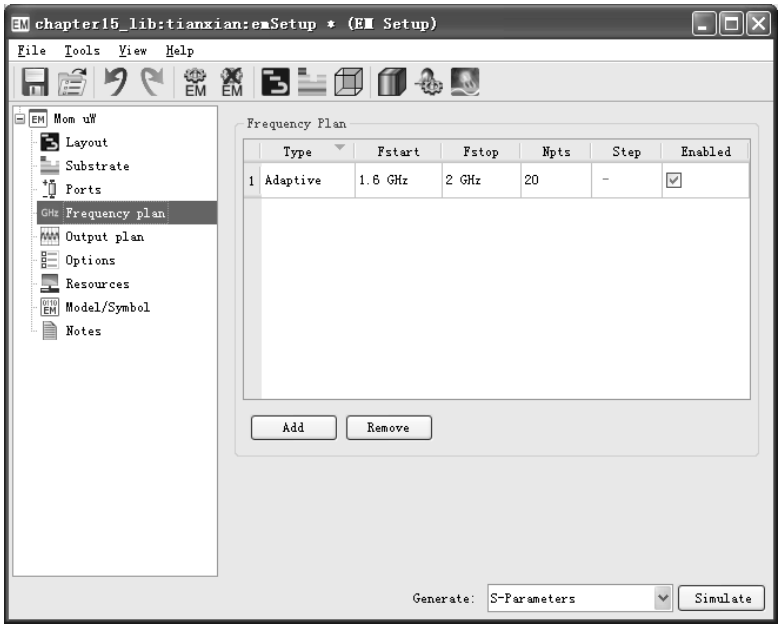


图 15-10　S 参数仿真设置

（5）单击图 15-10 中的 Simulate 按钮，开始进行 S 参数仿真，得到仿真结果如图 15-11 所示。

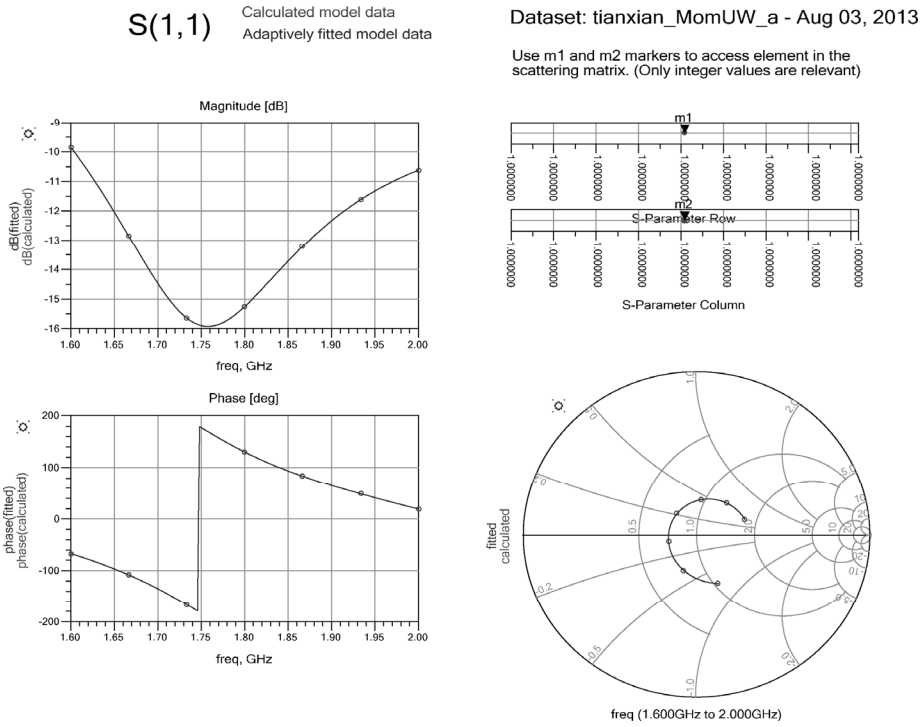


图 15-11　仿真结果

（6）单击按钮，进行 3D EM 图预览，可以通过该窗口的各个快捷按钮，实现多角度的预览，如图 15-12 所示。

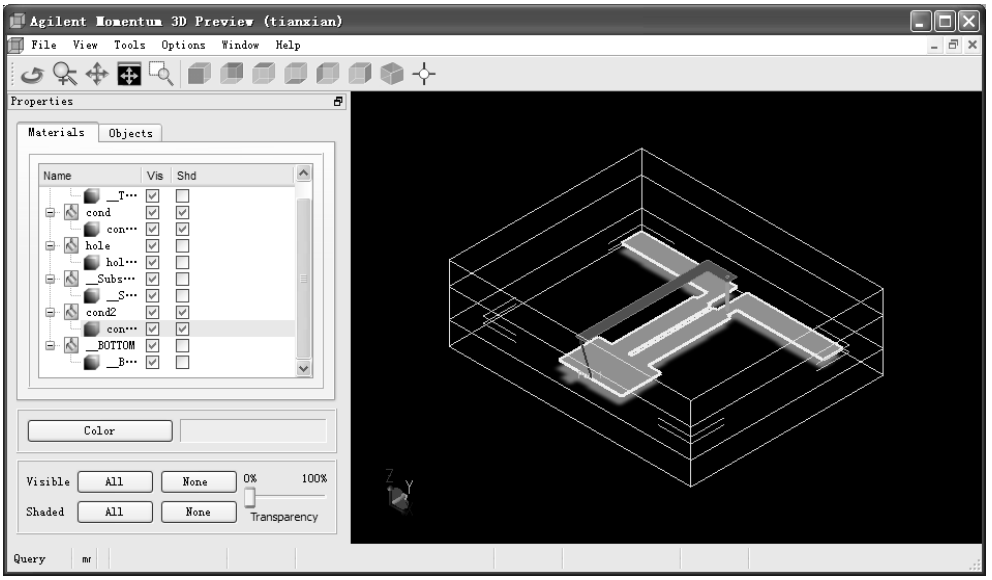
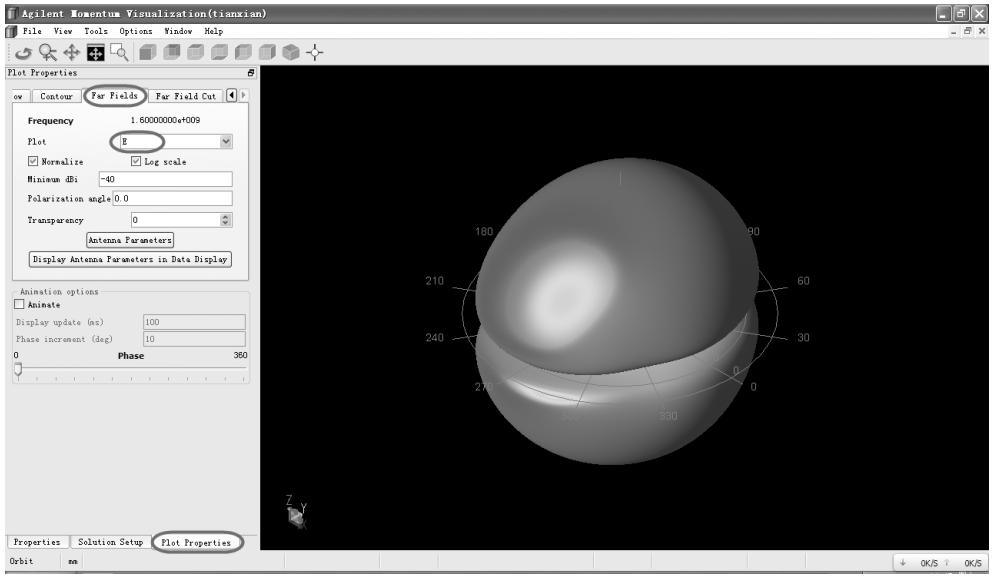


图 15-12　3D EM 预览图

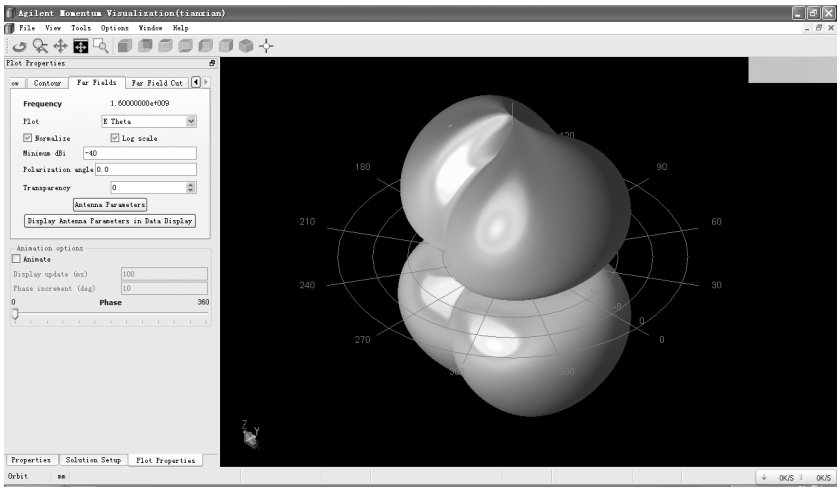
（7）单击按钮，完成三维及其他相关仿真结果的查看。在“Far Fields”选项中分别选择 E、E Theta 和 E Phi，得到如图 15-13（a），（b），（c）所示的 3D 曲线。

（8）通过单击图 15-13 中的Antenna Parameters按钮，可以查看天线在不同模式下的参数，如图 15-14 所示。

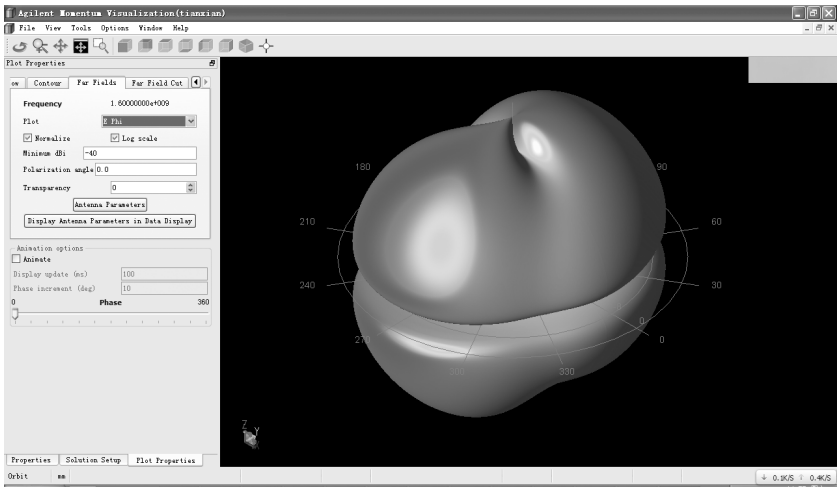


（a）

图 15-13　三维仿真结果



（b）



（c）

图 15-13　三维仿真结果（续）

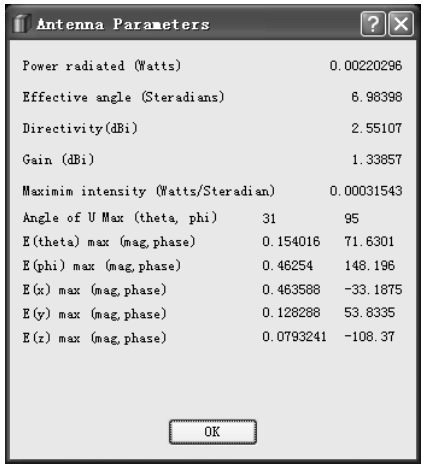


图 15-14　天线的具体参数

（9）单击图 15-13 中的“Far Field Cut”选项卡，可以查看 2D 的仿真结果，在该选项卡中，单击 Display Cut in Data Display 按钮，弹出相关的二维仿真结果，如图 15-15 所示。

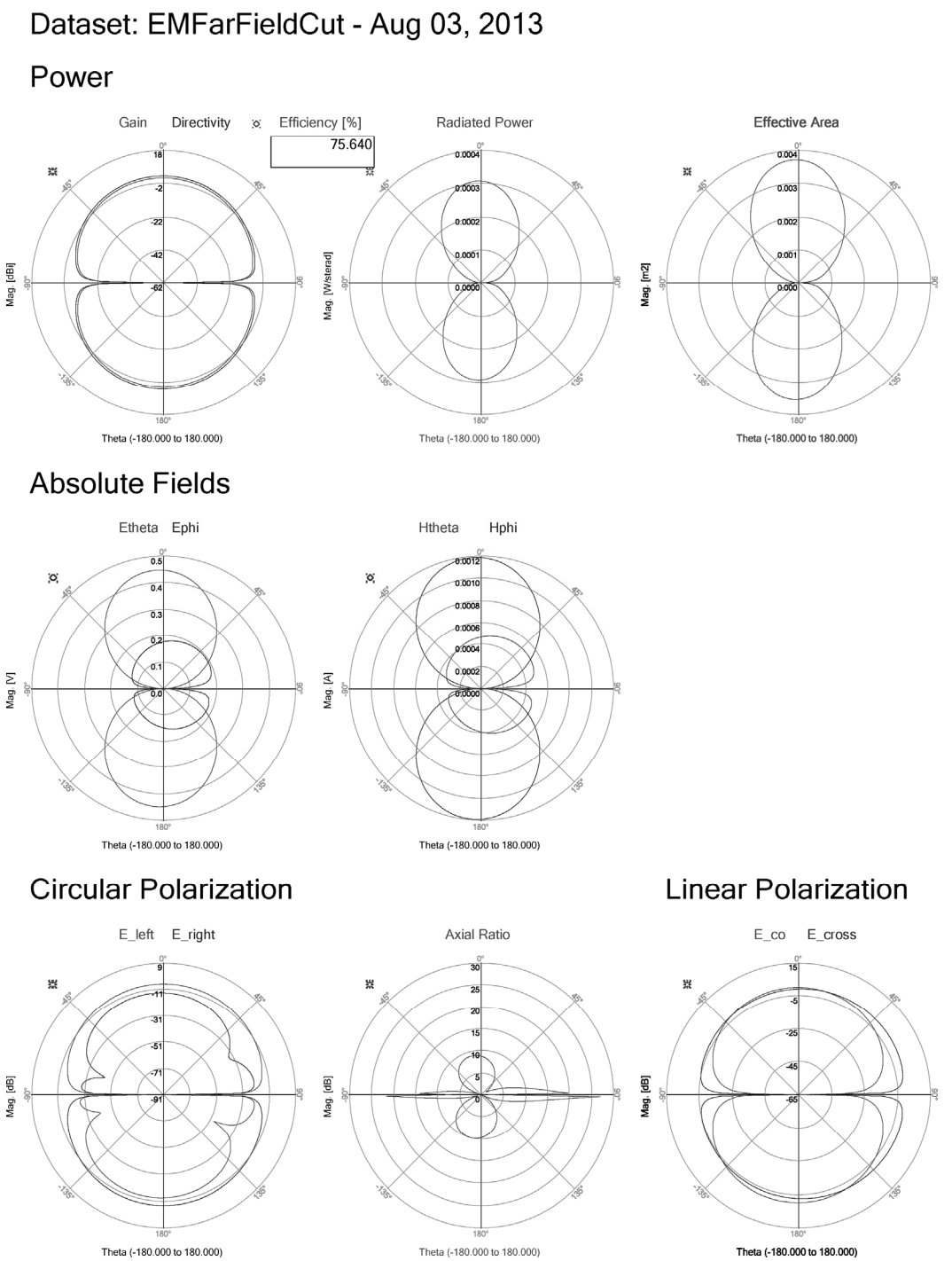


图 15-15　二维仿真结果

（10）观察天线的增益 Gain 图形，如图 15-16 所示，添加一个标记更清楚地观察 Gain 值。

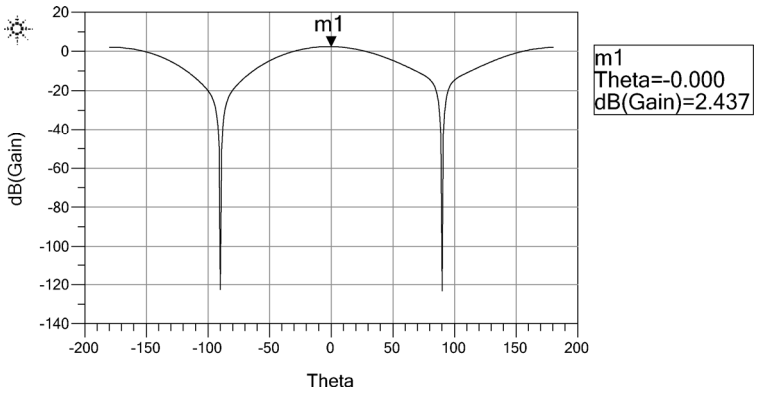


图 15-16　增益仿真结果

15.3　思考题

（1）尝试同时设置多个参数（如 W_d 和 L_b）对同一个目标（如反射损耗）进行优化。

（2）用 ADS 分析天线的各个参数（偶极子天线臂长 L_d、宽 W_d，巴伦线长 L_b，地板长 L_g、宽 W_g）对于天线性能（谐振频率、带宽、匹配、反射损耗等）的影响。

（3）讨论进一步减小天线尺寸的方法。

第 16 章　ADS2012 系统仿真

ADS 仿真软件除了提供强大的电路级仿真功能外，还可以用来进行系统级仿真。本章将介绍如何利用 ADS 对无线收发信机系统进行分析和仿真。通过本章内容，读者可以学习利用 ADS 进行系统级仿真的相关知识。

16.1　收发信机基本理论

本节首先介绍无线收发信机的基础知识，使读者对它们的组成、功能和结构等有一个基本的认识，为以后的系统仿真打下基础。

1．接收机

典型的无线接收机结构如图 16-1 所示，它由天线、射频滤波器、低噪声放大器、混频器、本振信号源、中频滤波器和中频放大器等部分组成。

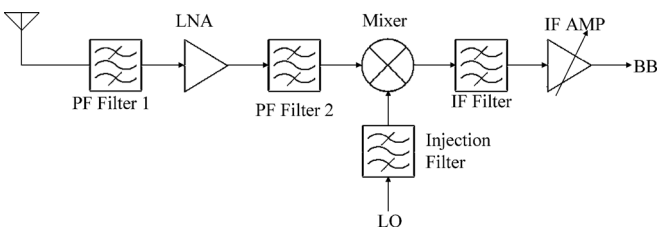


图 16-1　典型的无线接收机结构

【射频滤波器 1（PF Filter 1）】选择信号频段，限制输入信号带宽，减小互调失真；抑制杂散信号，避免杂散响应；减少本振泄漏。在频分系统中作为频域相关器。

【低噪声放大器（LNA）】在不使接收机线性被恶化的前提下提供一定的增益；抑制后续电路的噪声，降低系统的噪声系数。

【射频滤波器 2（PF Filter 2）】抑制由低噪声放大器放大或产生的镜像干扰；进一步抑制其他杂散信号；减少本振泄漏。

【混频器（Mixer）】将射频信号下变频为中频信号，是接收机中输入射频信号最强的模块，其线性度极为重要，同时要求较低的噪声系数。

【本振滤波器（Injection Filter）】滤除来自本振的杂散信号。

【本振信号源（LO）】为接收机提供本地振荡信号。

【中频滤波器（IF Filter）】抑制相邻信道的干扰，提供选择性，滤除混频器产生的互调干扰。如果存在第二次变频，需要抑制第二镜像。

【中频放大器（IF AMP）】将信号放大到一定的幅度供后续电路（如数模转换器或解调

器）处理。通常需要较大的增益并实现增益控制。

为了适应不同的通信系统的要求，无线接收机有很多结构，本章将介绍其中两种最常用的无线接收机结构：零中频接收机和超外差接收机。

超外差接收机结构与图 16-1 所示的典型结构相像，它首先使用混频器将射频信号搬移到一个频率低的多中频频率后再进行信道滤波、放大和解调等工作，这种接收机解决了高频信号处理所遇到的困难。

而零中频接收机的本振频率与接收信号的射频载波频率相同，因此经过混频器后的信号直接为基带信号，它是接收机最自然、最直接的实现方法。

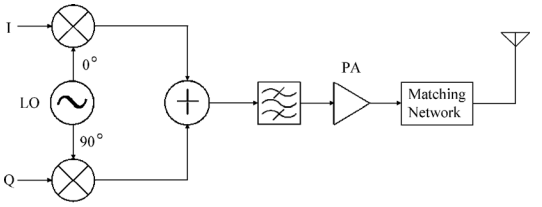


图 l6-2　典型的无线发射机结构

2．发射机

典型的无线发射机结构如图 16-2 所示，发射机的结构相对比较简单，主要由混频器、滤波器和功率放大器组成，这里就不再详细介绍。

下面设计一个接收机和发射机系统，使用行为级的功能模块实现收发信机的系统级仿真。

16.2　零中频接收机仿真

通过 16.1 节的介绍可知零中频接收机的本振频率与接收信号的载波频率相同，因此它的结构如图 16-3 所示。

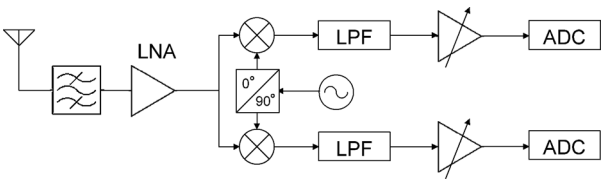


图 16-3　零中频接收机结构

16.2.1　创建新项目

创建新项目，在 chapter16_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，开始设计接收机。

16.2.2　射频前端电路的搭建

（1）在“Filters-Bandpass”类中，选择滤波器控件；在“System-Amps & Mixers”类中，选择放大器控件，放置到原理图中，按照技术要求，双击修改属性。

（2）单击工具栏中的图标，把各元件连接成如图 16-4 所示的射频前端电路。

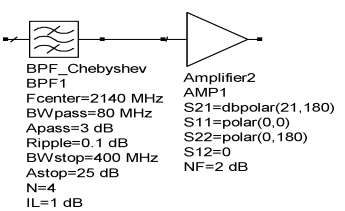


图 16-4　射频前端电路图

16.2.3　接收机频带选择性仿真

（1）在“Simulation-S_Param”类，把仿真器和“Term”放置到原理图中，单击图标，放置接地端口，双击，修改属性，单击工具栏中的图标，按照图 16-5 所示连接各个元件。

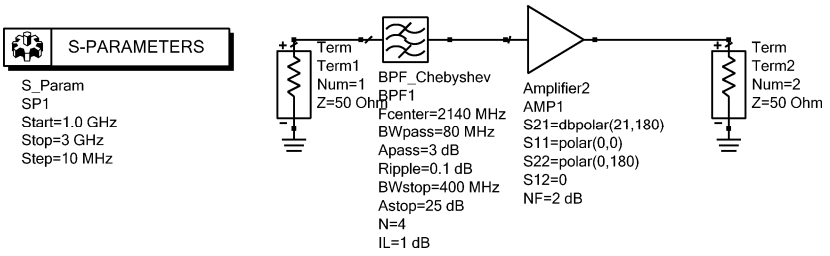


图 16-5　频带选择性仿真电路

（2）单击工具栏中的按钮，进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（3）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“S21”参数，单击 >>Add>> 按钮，弹出单位（这里选择 dB）设置窗口，单击两次 OK 按钮后，得到如图 16-6 所示的仿真曲线。

> m1 表示接收机在频带选择滤波器的中心频率（2GHz）有 20dB 的最大增益，也就是 LNA 的增益减去微波带通滤波器的插入损耗。m2 表示在偏离中心频率 70MHz 处为 25dB 左右的衰减。

（4）双击矩形框，重新设置 *X* 轴和 *Y* 轴的范围，插入两个标记，进一步观察射频前端部分的带宽，如图 16-7 所示。

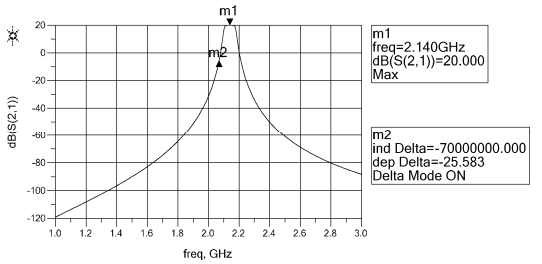


图 16-6　射频器前端带宽仿真曲线

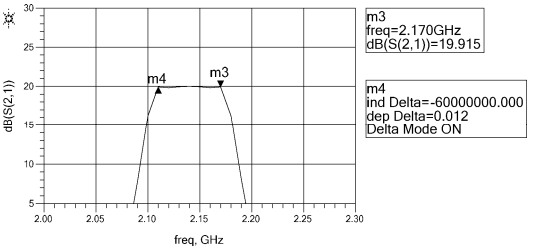


图 16-7　修改坐标后的仿真曲线

> m4 表示接收机射频前端的接收带宽为 6MHz，和 WCDMA 系统对移动终端下行链路的要求是吻合的，而且通带内的波动不超过 0.125dB。

16.2.4　下变频电路的搭建

（1）单击图标，新建原理图文件。

（2）在“System-Passive”类中，选择两个功分器控件，同时选择移相器控件，双击修改它们的属性后，插入到原理图中。

由于要将接收信号分为同向（I）和正交（Q）两路，所以本振信号也要分为两路，一路直接和接收信号混频，一路经移相器移 90°，再进入混频器混频，所以用到功分器和移相器。它们的属性设置如图 16-8 所示。

（3）在“System-Amps & Mixers”类中，选择两个混频器控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-9 所示。

> 混频器 SideBand 为设置上下边带，LOWER 为下边带；噪声系数 NF 为 13dB；转换增益 ConvGain 为 10dB。同时注意不要错选 Mixer2，它不是混频器而是用来进行非线性分析的。

（4）在“Sources-Freq Domain”类中，选择电压源控件，放置到原理图中，双击修改属性。由于接收机中频信号的频率为 0，故本振频率应和输入信号频率一致，设为变量 LO_freq，可以用 VAR 方便地赋值，输出电压设为 lV，如图 16-10 所示。

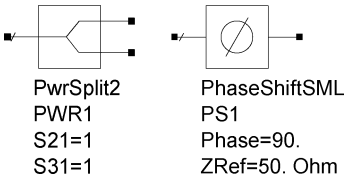


图 16-8 功分器和移相器属性设置

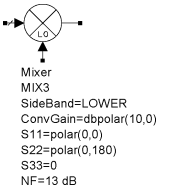


图 16-9 混频器属性设置

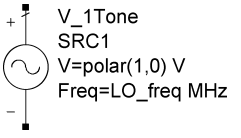


图 16-10 电压源参数设置

（5）在“Lumped-Components”类中，选择 50Ω的电阻，放置到原理图中。

（6）单击工具栏中的图标，把各元件连接成如图 16-11 所示的接收机下变频电路。

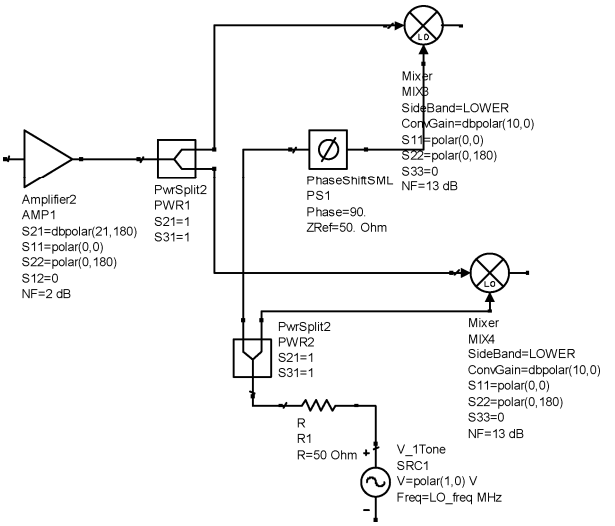


图 16-11 接收机下变频电路

16.2.5 模拟基带部分电路的搭建

模拟基带部分有两条支路，每条支路都由信道选择低通滤波器和基带放大器级联而成。

（1）在“Filters-Lowpass”类中，选择两个滤波器控件，放置到原理图中，双击修改

属性。

☺ Fpass=1.92MHz 滤波器−3dB 频率转折点为 1.92MHz;

☺ Apass=3dB 通频带衰减为 3dB;

☺ Fstop=5MHz 阻带截点为 5MHz;

☺ Astop=36dB 带外衰减为 36dB;

☺ Ripple=0.01dB 通频带纹波为 0.01dB;

☺ N=5 滤波器阶数为 5。

（2）在“System-Amps & Mixers”类中，选择两个放大器控件，放置到原理图中，双击修改属性。注意放大器增益设置为变量 G5，有助于后续的仿真。

（3）在“Simulation-S_Param”类中，选择终端负载元件，并插入原理图中。

（4）在工具栏中选择两个接地，放置到原理图中。

（5）单击工具栏中的图标，按照图 16−12 所示连接电路。

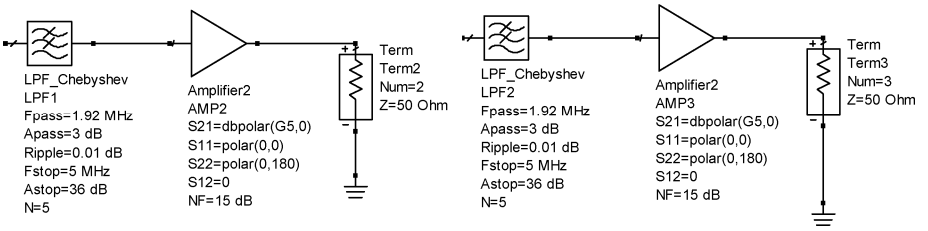


图 16−12　模拟基带电路

16.2.6　接收机信道选择性仿真

（1）在“Sources-Freq Domain”类中，选择功率源控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16−13 所示。信号的输出功率为变量 RF_freq MHz。

（2）单击工具栏中的图标，把射频前端部分、下变频部分和模拟基带部分按照图 16−14 所示连接起来。

（3）单击工具栏中的图标，把变量控件“VAR”放置在原理图上，双击该图标弹出变量设置窗口，添加变量设置属性，如图 16−14 所示。

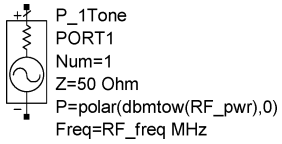


图 16−13　功率源属性设置

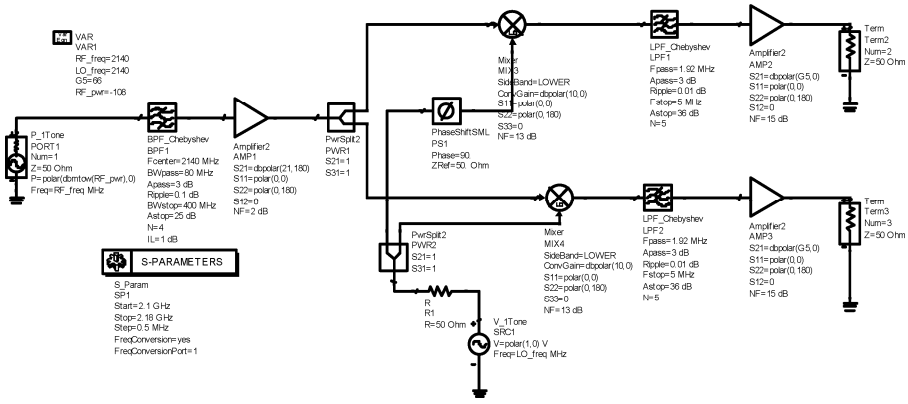


图 16−14　完整接收机原理图

（4）在“Simulation-S_Param”类中，把仿真器、“Term”和接地放置到相应位置，双击，修改属性，如图 16-14 所示。

（5）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，设置“S21”参数，单击 >>Add>> 按钮弹出单位设置窗口（这里选择 dB），两次单击 OK 按钮，仿真曲线如图 16-15 所示。

（7）改变图 16-15 的横纵坐标，并在新坐标中插入两个新的标记点，如图 16-16 所示。

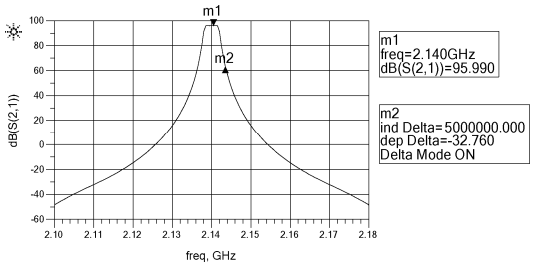


图 16-15　信道选择性仿真曲线

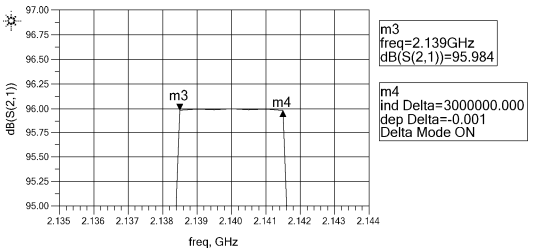


图 16-16　调整坐标后的仿真曲线

由图 16-15 可知，中心频率 2.14GHz 处的增益为 95.99dB，为系统的最大增益；邻道抑制达到了 32.76dB，优于设计目标。由图 16-16 可知，通频带宽为 3MHz，一般接收的信息都集中在离中心频率 2MHz 的范围内，因此不会导致接收到的信号产生较大的失真，通频带内的波动不大于 0.15dB。

16.2.7　接收机系统预算增益仿真

通过该仿真可以看到系统总增益在系统各个部分中的分配情况。预算增益仿真在谐波平衡分析以及交流分析中都可以进行，但如果在交流仿真中进行的话，混频器不能是晶体管级的。因为这里进行的是行为级仿真，混频器的非线性特征是已知的，所以用交流分析来进行仿真。

（1）在“Simulation-AC”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性。频率栏设为“Single point”，频率为 2.14GHz，“Parameters”栏中的“Enable AC frequency conversion”和“Perform budget simulation”都要激活。

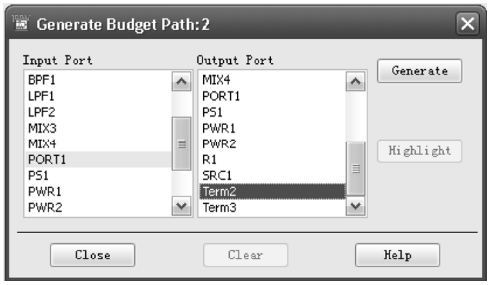


图 16-17　预算路径设定

（2）预算路径设定。选择菜单栏【Simulate】→【Generate Budget Path】命令，打开“Generate Budget Path”窗口，如图 16-17 所示。在“Generate Budget Path”窗口中选择输入为功率源 PORT1 和输出端 Term2，单击 Generate 按钮设定好预算路径。

（3）建立预算增益方程。完成上步操作后，同时系统将自动生成预算增益方程，如图 16-18 所示。电路原理图中的预算增益路径被高亮显示，如图 16-19 所示。

（4）在“Simulation-AC”类中，选择控件，放置到原理图中，双击设置其中的方

程，如图 16-20 所示。

```
MeasEqn
BudPath
budget_path = ["PORT1.t1","BPF1.t2","AMP1.t2","PWR1.t2","MIX3.t2","LPF1.t2","AMP2.t2","Term2.t1"]
```

图 16-18　预算增益方程

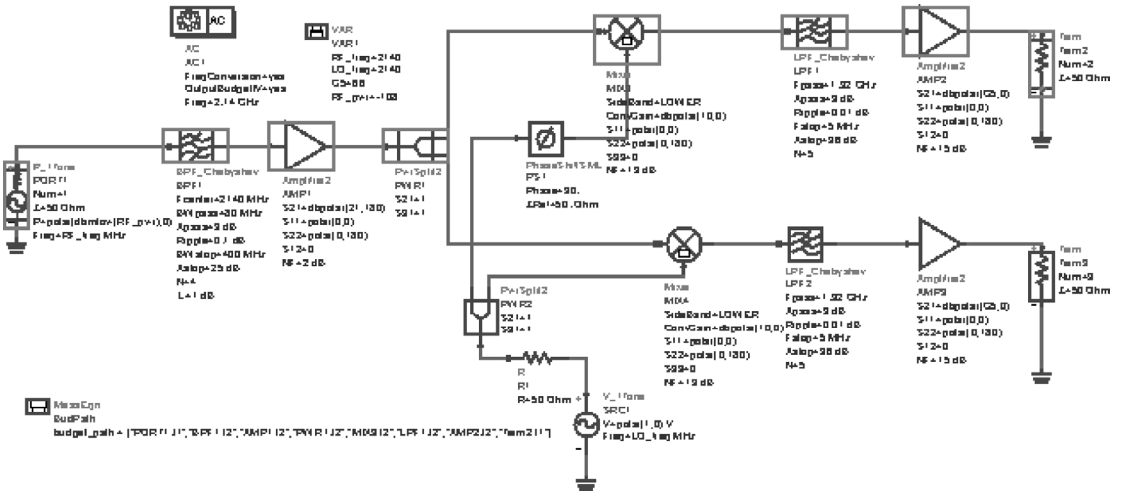


图 16-19　高亮显示的预算增益路径

（5）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后单击数据显示窗口。

（6）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“BudGain1”参数，单击 >>Add>> 按钮，单击 OK 按钮。

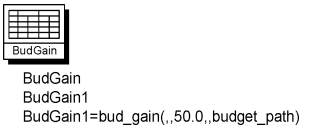


图 16-20　预算增益控件的设置

（7）双击 *Y* 轴坐标，出现“Trace Options”窗口，选择“Trace Expression”选项卡，修改表达式，输入 BudGain[0]，如图 16-21 所示。

（8）单击 OK 按钮后，出现增益预算仿真曲线，如图 16-22 所示。

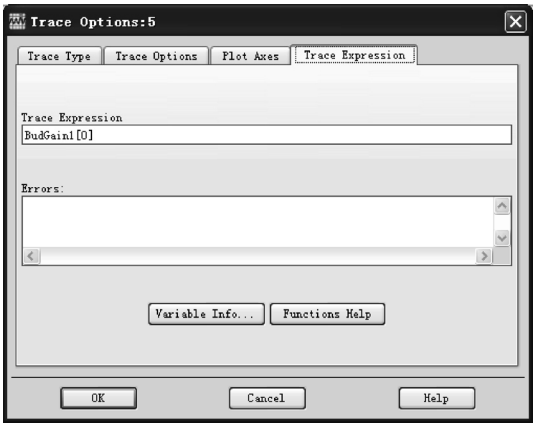


图 16-21　修改 *Y* 轴表达式

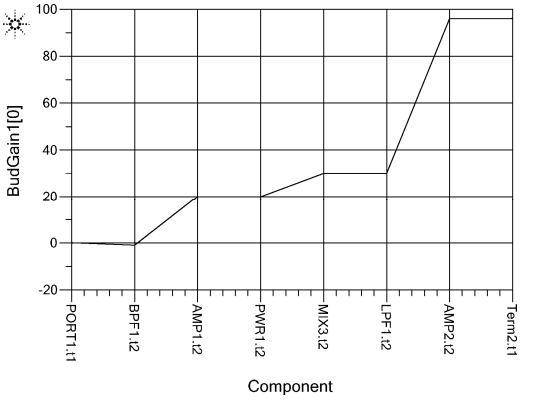


图 16-22　预算增益仿真曲线

> 预算增益仿真必须明确指定频率，这里只有唯一的频率 2.14GHz，是频率数组中的第 1 个，故[0]是必需的。

为了较全面地进行分析，仿真会在接收机总增益最大和最小两种情况下进行。当 VGA 增益为最大值 66dB 时，信号源的功率电平为接收机的灵敏度−108dBm（已考虑了天线双工器的损耗），反之，当 VGA 的增益最小时，信号源应输入接收机所能接收的最大功率。这些参数的变化都要在 VAR 中反映出来。

（9）双击“VAR”控件，改变原理图设计窗口中的变量值，令 G5=24，RF_pwr=−32，并再次执行仿真，得到最小预算增益仿真曲线，如图 16−23 所示。

（10）将两次仿真结果放置到一个图中，可以清楚地看到接收机在 VGA 增益最大和最小的情况下整机增益的分配情况，如图 16−24 所示。

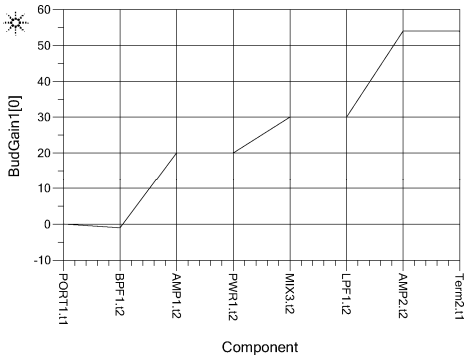


图 16−23　最小预算增益仿真曲线

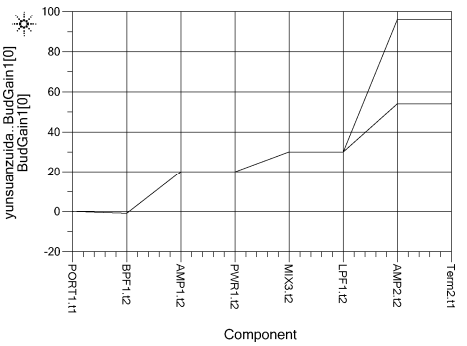


图 16−24　最大、最小增益预算比较

（11）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“BudGain1[0]”和修改变量后的“BudGain1[0]”参数，单击“Add”按钮，最大和最小增益数据结果如图 16−25 所示。

Component	BudGain1[0]	BudGain1[0]
PORT1.t1	-7.949E-5	-7.949E-5
BPF1.t2	-1.000	-1.000
AMP1.t2	20.000	20.000
PWR1.t2	20.000	20.000
MIX3.t2	30.000	30.000
LPF1.t2	30.000	30.000
AMP2.t2	54.000	96.000
Term2.t1	54.000	96.000

图 16−25　最大和最小预算增益数据

16.2.8　接收机下变频分析

通过该仿真可以得到接收机的频域响应特性，并清楚地看到接收机是如何将射频信号的频谱搬移到零频的。这里使用谐波平衡仿真。

（1）双击功率源 PORT1，并设置接收输入信号源的功率为−40dBm。删除产生本地振荡信号的电压源，并使用功率源代替，设置功率源的频率为 LO_freq，输入功率为 0.02W。

（2）单击工具栏中的控件，出现对话框后，定义电路“Vin”、“Vout_i”、“Vout_q”节点，如图 16−26 所示。

（3）在“Simulation-HB”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16–26 所示。

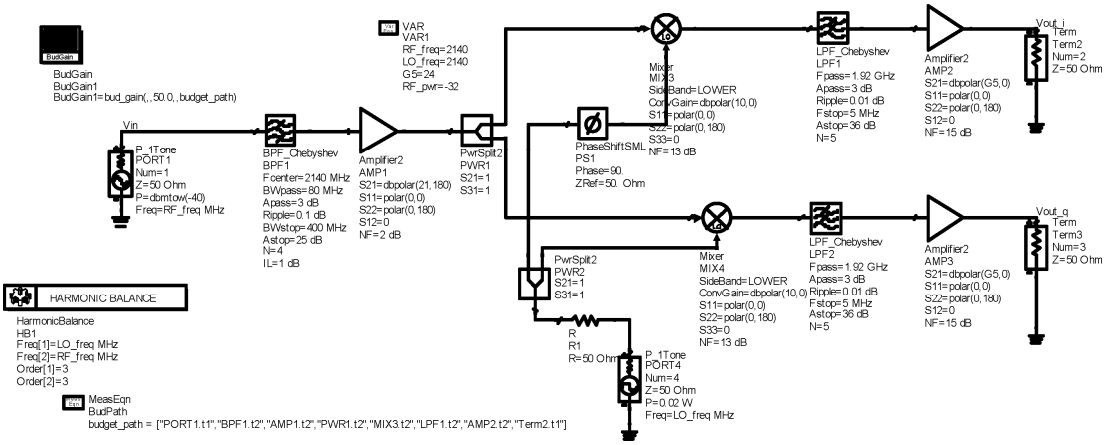


图 16–26　下变频仿真电路

（4）单击工具栏中的按钮，进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“Vin”参数，单击 >>Add>> 按钮，弹出设置单位（这里选择 dB）窗口，单击两次 OK 按钮后，显示 Vin 参数仿真曲线，如图 16–27 所示。

（6）同样方法显示 Vout_i 参数仿真曲线，如图 16–28 所示。

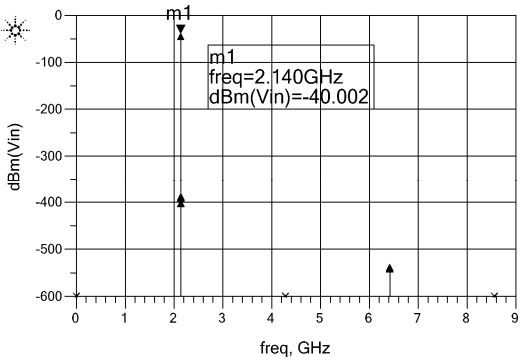


图 16–27　Vin 参数仿真曲线

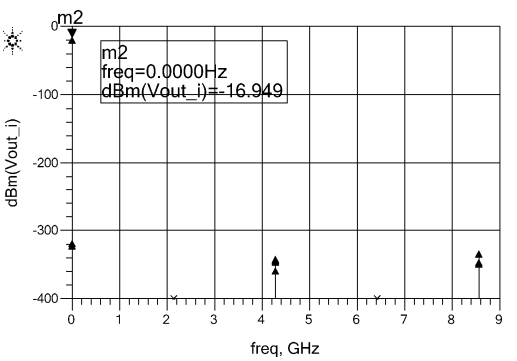


图 16–28　Vout_i 参数仿真曲线

从仿真结果图中可以看到，接收机将射频输入信号的频谱从 2.14GHz 的载频搬移到零中频。

16.3　超外差接收机仿真

超外差接收机结构与零中频接收机基本相同，区别在于输出信号不再是零频率的基带信号，而是中频信号，这里选择中频为 318MHz，相应的本振频率改为 1 822MHz。仍通过下变频部分将信号分为 I/Q 两路，混频器后面不再是基带处理而是中频处理，采用切比雪夫

5 阶带通滤波器进行信道选择。为了简单起见，中频放大设置和零中频方案保持一致。

（1）单击图标，新建电路原理图，开始设计超外差接收机。

（2）复制零中频接收机原理图，除了下变频电路和中频放大电路外，删除其他元件。在“Filters-Bandpass”类中，选择控件，放置到原理图中，双击设置属性，如图 16-29 所示。在本振中设定一组相位噪声，然后用谐波平衡分析的方法进行仿真，在输出端观察相位噪声的情况，另外给出超外差接收机的频谱特性。

（3）为进行相位噪声仿真，需要专门的本振源，在“Sources-Freq Domain”类中，选择控件，放置到原理图中，双击设置属性，如图 16-30 所示。

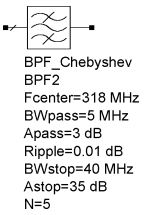


图 16-29　带通滤波器设置

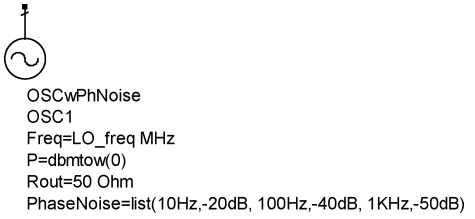


图 16-30　本振源设置

（4）在“Simulation-HB”类中，选择控件，双击修改属性，如图 16-31 所示。

> 设定噪声分析的范围和步进，要与 OSCwPhNoise 控件参数设置相一致。

“HB noise controller”必须和“HB simulation controller”搭配使用。在使用多个“HB noise controller”进行不同噪声的测量时，只需一个“HB simulation controller”即可。

（5）选择控件，双击设置属性，如图 16-32 所示。

> 将频率参数设置为射频输入频率和本振频率，不需要设置中频频率，默认的谐波阶数和混频最大阶数将自动计算电路中的所有频率，包括中频。在“NoiseCons”选项卡中选择噪声仿真器 NC1。

（6）双击“VAR”控件，设置属性，如图 16-33 所示。

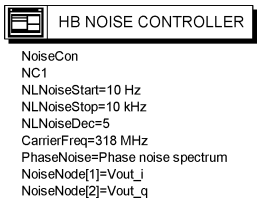


图 16-31　HB 噪声仿真器设置

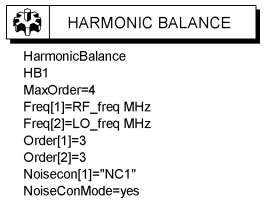


图 16-32　HB 仿真控制器设置

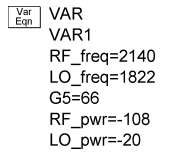


图 16-33　VAR 变量设置

（7）完成上述关键元件的设置后，按照图 16-34 所示完成超外差接收机电路的搭建。

（8）单击工具栏中的按钮，进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（9）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“Vout_i”参数，单击 >>Add>> 按钮，弹出单位设置（这里选择 dB）窗口，单击两次 OK 按钮后，显示 Vout_i 参数曲线。同样方法显示出 Vout_i.pnmx 参数曲线，如图 16-35 所示。

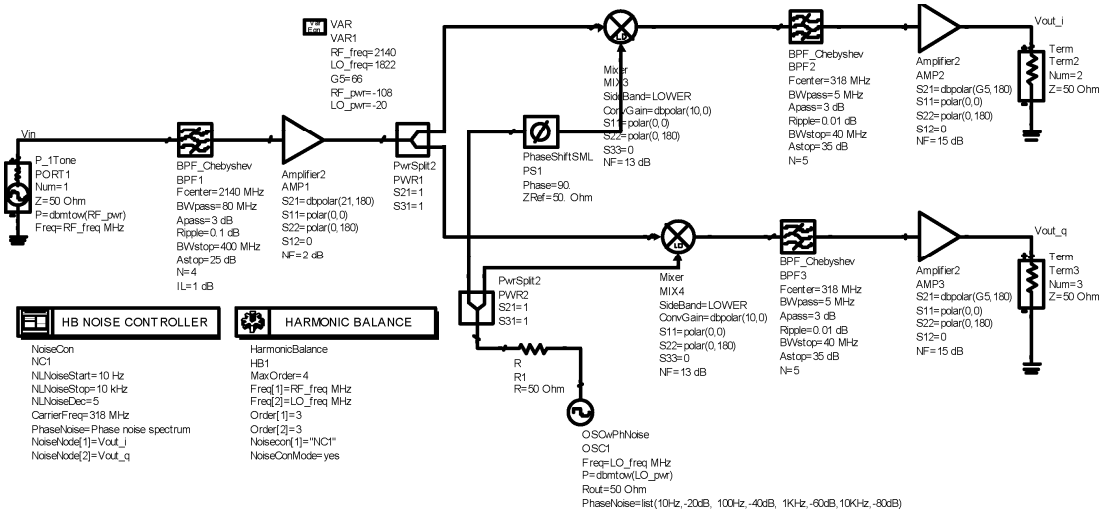


图 16-34　超外差接收机电路

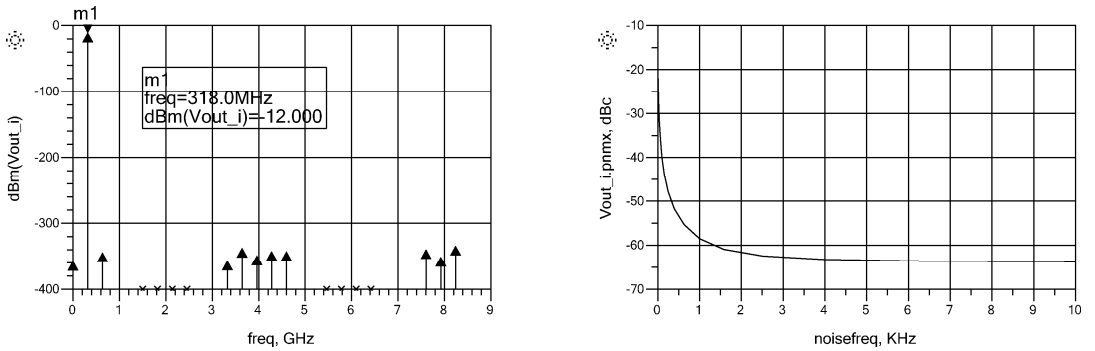


图 16-35　中频 I 通道仿真曲线

16.3.1　本振输出功率对接收机性能的影响

分析本振输出功率对接收机的影响的电路原理图，与外差式接收机结构基本相同。

（1）双击“VAR”控件，设置属性，如图 16-36 所示。

（2）在“Simulation-AC”类中，选择Var Eqn控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-37 所示。

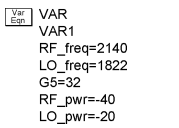


图 16-36　VAR 属性修改

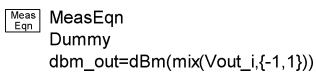


图 16-37　MeasEqn 等式

（3）在“Simulation-HB”类中，选择HB控件，双击修改属性，完成设置后得到完整电路，如图 16-38 所示。

（4）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里

选择“dbm_out”参数，单击 >>Add>> 按钮，弹出单位设置（这里选择 dB）窗口，单击两次 OK 按钮后，显示 dbm_out 参数仿真曲线，如图 16-39 所示。

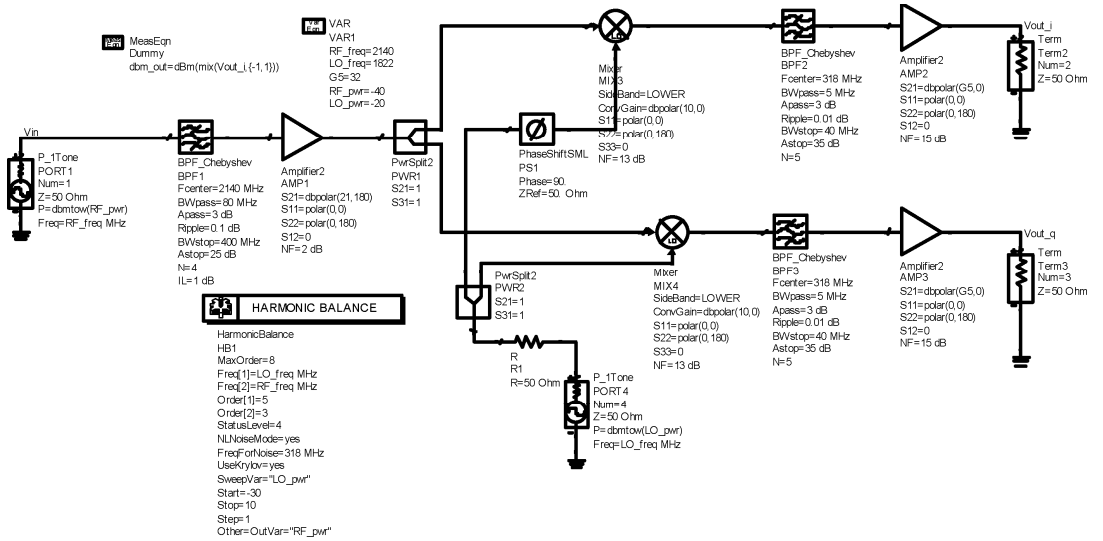


图 16-38　本振输出功率影响电路图

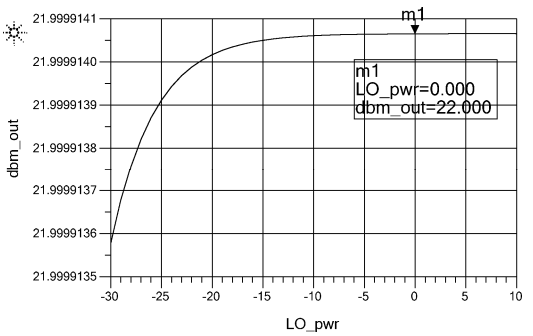


图 16-39　仿真曲线

从仿真图中可以看出输出功率电平开始随本振输出功率的增加而逐渐增大，当本振功率大于 0dBm 时，输出功率逐渐稳定在约 22dB。

16.3.2　整机增益随本振功率的变化

为了得到整机增益随本振功率的变化曲线，要建立方程，可以直接运用仿真数据显示窗口中的方程编辑模块完成此项操作。

（1）单击左侧工具栏中的 Eqn 按钮，编辑方程为

```
Eqn IF_gain=dbm_out-RF_pwr[0]
```

单击左侧工具栏中的按钮，插入 IF_gain 仿真曲线，如图 16-40 所示。

从图中可以看出仿真结果与输出功率是一致的，必须有足够的本振功率输出才能使增益达到稳定的最大值。

（2）单击左侧工具栏中的按钮，整机增益数据，如图 16-41 所示。

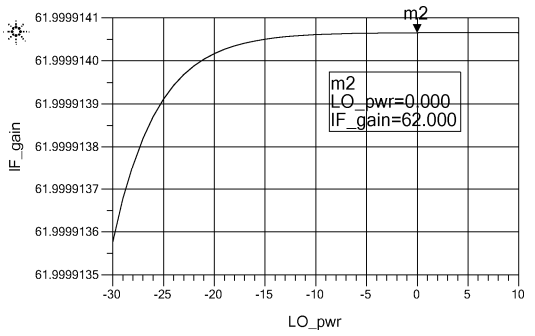


图 16-40　IF_gain 仿真曲线

LO_pwr	IF_gain
-30.000	62.000
-29.000	62.000
-28.000	62.000
-27.000	62.000
-26.000	62.000
-25.000	62.000
-24.000	62.000
-23.000	62.000
-22.000	62.000
-21.000	62.000
-20.000	62.000
-19.000	62.000
-18.000	62.000
-17.000	62.000
-16.000	62.000
-15.000	62.000
-14.000	62.000
-13.000	62.000
-12.000	62.000
-11.000	62.000
-10.000	62.000
-9.000	62.000
-8.000	62.000
-7.000	62.000
-6.000	62.000
-5.000	62.000
-4.000	62.000
-3.000	62.000
-2.000	62.000
-1.000	62.000

图 16-41　整机增益数据

16.4　发射机预算增益仿真

（1）新建一个原理图文件，在“Sources-Freq Domain”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-42 所示。

（2）在“System-Amps & Mixers”类中，选择放大器控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-43 所示。

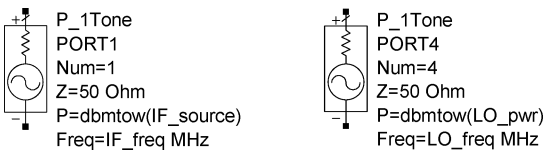


图 16-42　功率源参数设置

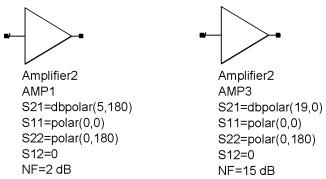


图 16-43　放大器参数设置

（3）在“System-Amps & Mixers”类中，选择混频器控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-44 所示。

（4）在“Filters-Bandpass”类中，选择滤波器控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-45 所示。

（5）在“Lumped-Components”类中，选择电阻控件，放置到原理图中，在“Simulation-S_Param”类中，选择“Term”，单击图标，放置各端口接地，单击工具栏中的按钮，把各个元件按照图 16-46 所示连接好。

（6）单击工具栏中的图标，把变量控件 VAR 放置在原理图上，双击该图标弹出变量

设置窗口进行设置，如图 16-47 所示。

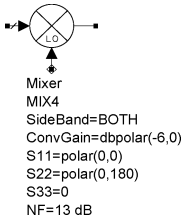


图 16-44　混频器参数设置

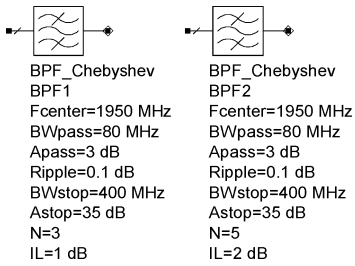


图 16-45　滤波器参数设置

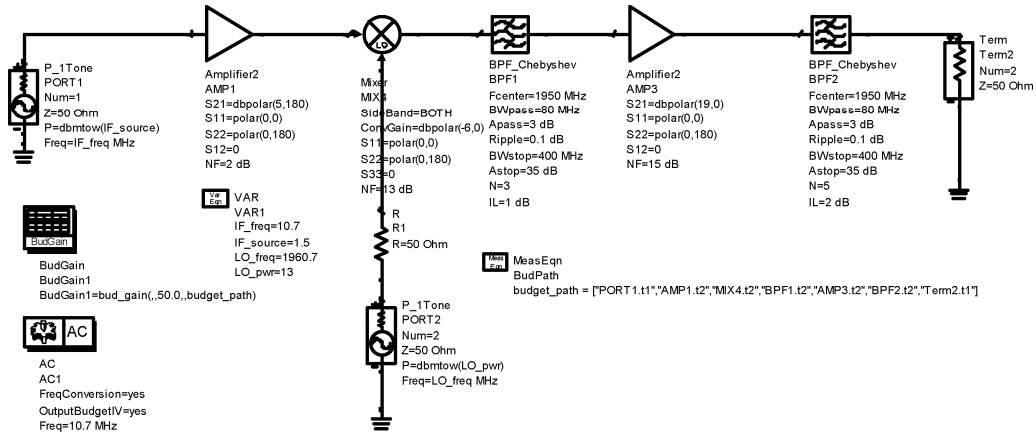


图 16-46　发射机增益电路图

（7）在“Simulation-AC”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 16-48 所示。

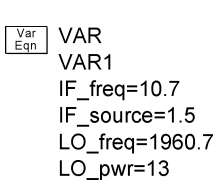


图 16-47　VAR 变量设置

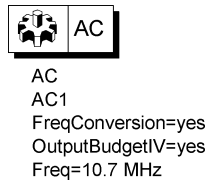


图 16-48　AC 参数设置

（8）选择菜单栏中的【Simulate】→【Generate Budget Path】命令，打开“Generate Budget Path”窗口。在“Generate Budget Path”窗口中选择好输入端为功率源 PORT1 和输出端 Term2，单击 Generate 按钮，可设置好预算路径，同时系统将自动生成预算增益方程，如图 16-49 所示。

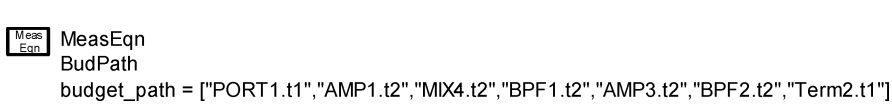


图 16-49　预算增益方程

（9）选择控件，放置到原理图中，双击设置方程，如图 16-50 所示。

（10）单击工具栏中的按钮进行仿真，仿真结束后出现数据显示窗口。

（11）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，单击 Advanced... 按钮，输入“BudGain1[0]”，单击 OK 按钮，得到参数仿真曲线，如图 16-51 所示。

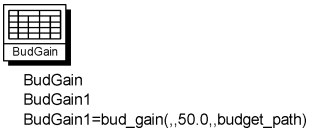


图 16-50　预算增益控件参数设置

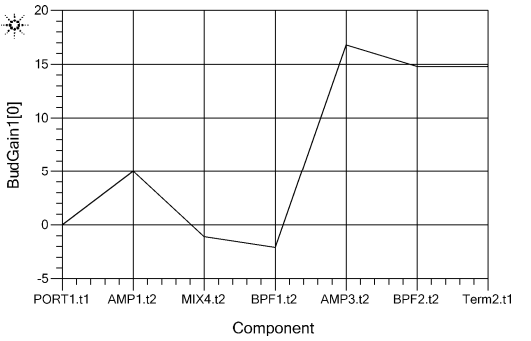


图 16-51　发射机预算增益仿真曲线

16.5　思考题

（1）放大器元件的参数“噪声系数 NF”的意义是什么？该参数对放大器的性能有没有影响？

（2）在零中频接收机的射频前端参数设置中，中心频率为什么选择 2.14GHz？

（3）在超外差接收机仿真中，本章只对 I 通道输出信号频谱和相位噪声进行了输出，请读者自行输出 Q 通道频谱曲线和相位噪声。

第 17 章　基于 DSP Design 的设计

ADS2012 软件可用于数字信号系统设计。本章主要介绍 ADS2012 的 DSP Design 的设计和使用方法，DSP Design 作为 ADS2012 集成环境的一部分，可以完成原理图的创建、运行、建立、仿真，以及数据存储和显示等工作。DSP Design 设计使用灵活，以适应不同的和特殊的应用、高效接口和设计流程等。

17.1　DSP 设计的基本理论

DSP Design 是 ADS2012 仿真软件的重要组成部分，DSP Design 独立于模拟/射频仿真的元件库，主要包括以下组件。

【仿真和数据显示组件】主要包含 Controllers、Sinks 和 Interactive Controls and Displays 三个库，用它们可以完成仿真设置、控制以及数据采集和显示。

【信号转换组件】包含在 Signal Converters 库中，可以把标量或矩阵数据转换成整型、双精度浮点型、定点和复数型数据。

【数字组件】主要用于完成数字信号处理算法设计的各种行为级模型，这些组件是数字信号处理的基础，主要包括的库有 Numeric Advanced Comm、Numeric Communications、Numeric Control、Numeric Fixed-Point DSP、Numeric Logic、Numeric Math、Numeric Matlab 等。

【HDL 组件】包含在 HDL Blocks 库中，可以用来完成对 ASIC 或 FPGA 的数据传输和系统级的设计。

【即时组件】是通信系统中特定的设计，常用的组件包括混频器、符号转换器、分配器、调制器、解调器以及放大器等组件，主要包括的库有 Timed Data Processing、Timed Filters、Timed Linear、Timed Modem、Timed Nonlinear、Timed RF Subsystems、Timed Sources 等。

【天线和传播组件】包含在 Antennas & Propagation 库中，用于信号射频传输、天线效应分析、微带、多通道失真以及 CDMA、TDMA 等的设计。

【电路协同仿真组件】包含在 Circuit Cosimulation 库中，在模拟/射频设计中将该组件作为一个子网路使用。模拟/射频设计师设计电路包络仿真时经常用到。

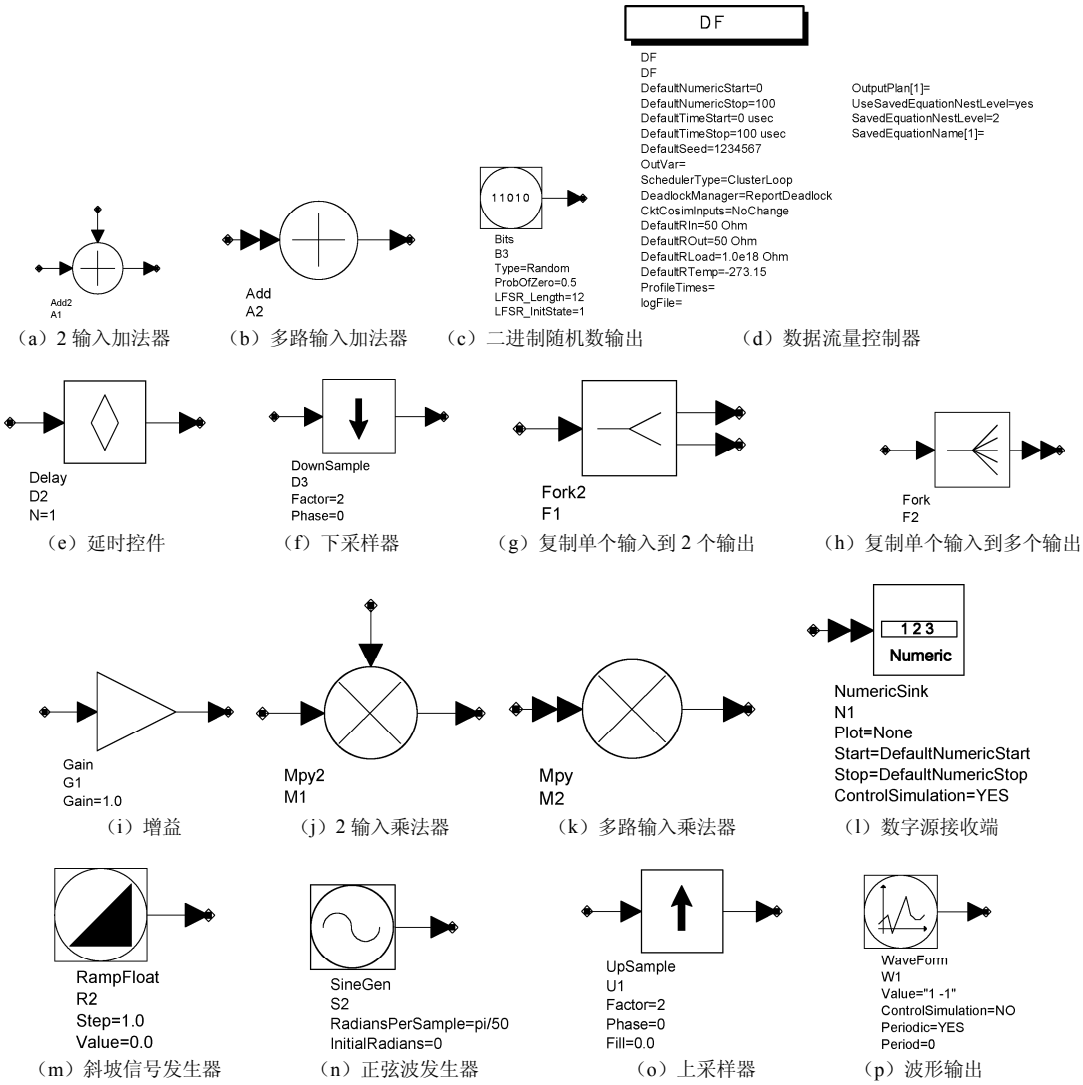
在 ADS2012 菜单的面板上，选择“Common Components”控制面板，这里含有常用组件，如图 17-1 所示。

各个组件的输入、输出的箭头颜色不同，分别表示不同的含义：

【洋红（Magenta）】表示组件输入或输出的是定点（fixed-point）数据；

【蓝色（Blue）】表示组件输入或输出的是浮点型（floating-point）数据；

【橙色（Orange）】表示组件输入或输出的是整型（integer）数据；



（a）2 输入加法器　（b）多路输入加法器　（c）二进制随机数输出　（d）数据流量控制器

（e）延时控件　（f）下采样器　（g）复制单个输入到 2 个输出　（h）复制单个输入到多个输出

（i）增益　（j）2 输入乘法器　（k）多路输入乘法器　（l）数字源接收端

（m）斜坡信号发生器　（n）正弦波发生器　（o）上采样器　（p）波形输出

图 17-1　常用组件

【绿色（Green）】表示组件输入或输出的是复数（complex）数据；

【黑色（Black）】表示组件输入或输出的是即时（timed）数据；

【红色（Red）】表示组件输入或输出的数据是任意类型。

电路图连线分为细线（Thin lines）和粗线（Thick lines）两种：

【细线】表示连接组件输入或输出的是标量（scalar）数据；

【粗线】表示连接组件输入或输出的是矩阵（matrix）数据或总线（bussed）数据。

17.2　DSP Design 的重要概念和特征

本节主要介绍利用 DSP Design 设计涉及的一些重要概念，以基本的电路设计为例，在介绍基本概念的同时学会使用 DSP Design 的方法。

17.2.1 位到符号表的转换

（1）创建新项目，在 chapter17_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，命名为 BitstoSymbolsA，开始设计。

（2）插入二进制随机数输出源。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-2 所示。

（3）插入位到整数转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，nBits 参数修改为 2，表示一次读入 2 个 2 进制数转换成整数，如图 17-3 所示。

（4）插入整数增益控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，增益值设置为 2，如图 17-4 所示。

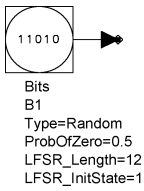


图 17-2 二进制随机数输出源

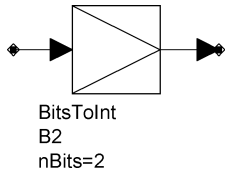


图 17-3 转换器

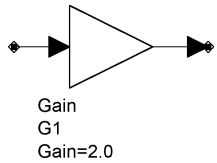


图 17-4 增益控件

（5）插入输出为整数的常数控件。在“Numeric Sources”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，Level 设置为-3，如图 17-5 所示。

（6）插入多输入加法器控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-6 所示。

（7）插入数据分配器控件。在“Numeric Control”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-7 所示。

（8）插入数字接收器终端。在“Sinks”控件面板中选取控件，插入一个输入接收端和两个输出接收端，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-8 所示。

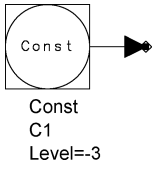


图 17-5 常数控件

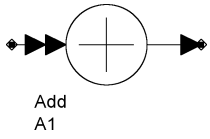


图 17-6 多输入加法器控件

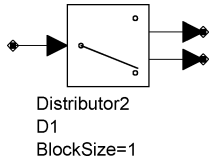


图 17-7 数据分配器控件

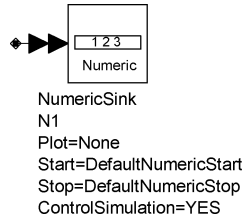


图 17-8 数字接收器终端

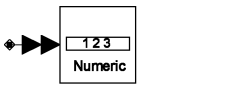
编辑每个接收端的例化名 N1、N2、N3，分别修改为 BitsIN（见图 17-9）、SymbolsQ（见图 17-10）、SymbolsI（见图 17-11）。修改数字接收端的参数：

☺ 输入端数字接收端 BitIN：Start=DefaultNumericStart，Stop=200。表示该仿真将在 200 个位之后停止。

☺ 输出端数字接收端 SymbolsQ、SymbolsI：Start=0，Stop=50。

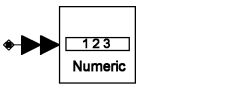
（9）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起

来，如图 17-12 所示。



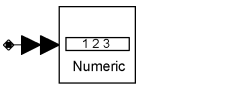
NumericSink
BitsIN
Plot=None
Start=DefaultNumericStart
Stop=200
ControlSimulation=YES

图 17-9　输入信号数字接收终端



NumericSink
SymbolsQ
Plot=None
Start=0
Stop=50
ControlSimulation=YES

图 17-10　SymbolsQ 数字接收终端



NumericSink
SymbolsI
Plot=None
Start=0
Stop=50
ControlSimulation=YES

图 17-11　SymbolsI 数字接收终端

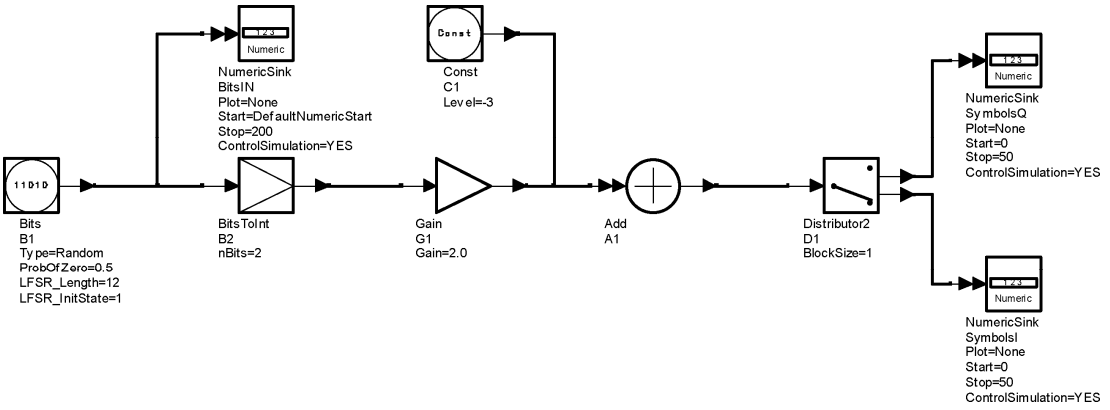


图 17-12　位到符号表的变换电路 1

（10）插入数据流仿真控件。在“Controllers”控件面板中选取 控件，参数默认即可，如图 17-13 所示。

（11）单击仿真 按钮，仿真调试。仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏选择【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口。选择默认数据名 BitstoSymbolsA。插入输入数据矩形图，显示数据输入端的信息，如图 17-14 所示。



DF
DF
DefaultNumericStart=0
DefaultNumericStop=100
DefaultTimeStart=0 usec
DefaultTimeStop=100 usec

图 17-13　数据流仿真控件

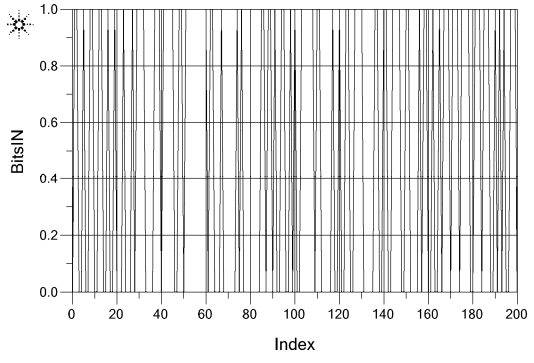


图 17-14　输入端矩形图

（12）插入输出数据矩形图。插入 SymbolsI 和 SymbolsQ 数据，选择“trace type”标签，类型为“sample”，如图 17-15 所示。

📖 结束时间是 200，和前面设置的一致。

（13）插入一个以星座显示的矩形图，显示接收端数据 SymbolsI 和 SymbolsQ。插入矩形图，弹出对话框，选择“SymbolsQ”，单击 >>Add Vs...>> 按钮，弹出独立变量对话框，选择“SymbolsI”，单击 OK 按钮，如图 17-16 所示。双击仿真图形弹出“Trace Options”窗口，选择“Trace Type”选项卡，选择“Scatter”显示方式，单击 OK 按钮；双击矩形图，弹出菜单，选择“Plot Options”选项卡，取消“auto”选项，改变 x 轴和 y 轴的范围，范围扩大到从-5～+5，单击 OK 按钮，显示如图 17-17 所示的星座图。

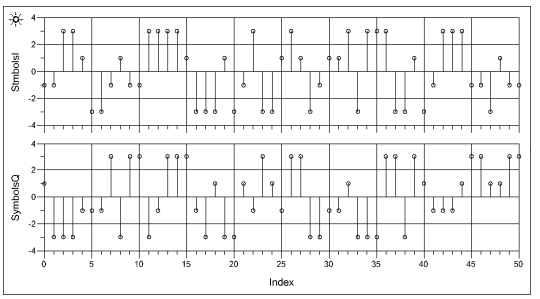


图 17-15　SymbolsQ 和 SymbolsI 矩形图

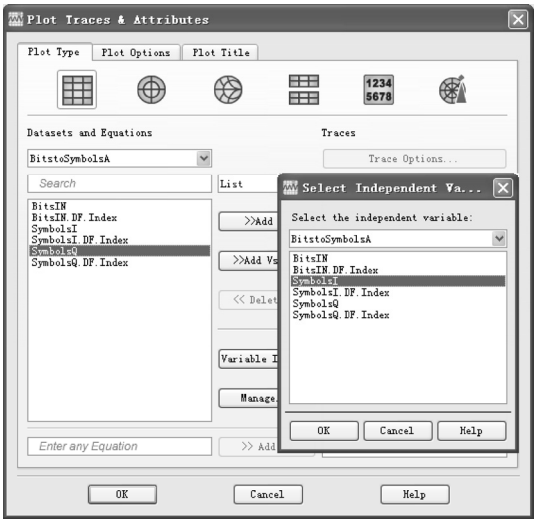


图 17-16　添加变量对话框

（14）插入列表显示数据，如图 17-18 所示。

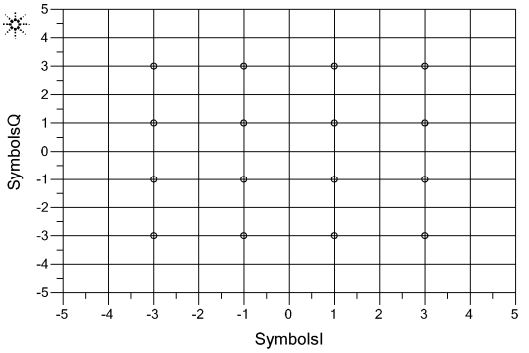


图 17-17　输出数据星座图 1

Index	BitsIN	Index	SymbolsI	SymbolsQ
0	0.000	0	-1.000	1.000
1	1.000	1	-1.000	-3.000
2	1.000	2	3.000	-3.000
3	0.000	3	3.000	-3.000
4	0.000	4	1.000	-1.000
5	1.000	5	-3.000	-1.000
6	0.000	6	-3.000	-1.000
7	0.000	7	-1.000	3.000
8	1.000	8	1.000	-3.000
9	1.000	9	-1.000	3.000
10	0.000	10	-1.000	3.000
11	0.000	11	3.000	-3.000
12	1.000	12	3.000	-1.000
13	1.000	13	3.000	3.000

图 17-18　输入、输出数据列表 1

17.2.2　不同的映射方法实现位到符号表的转换

（1）创建新项目，在 chapter17_wrk 项目空间下新建原理图，单击图标，开始设计。

（2）把 17.2.1 节的原理图另存为一个新的设计，命名为 BitToSymbolsb。

（3）删除增益控件、常数输出源控件、加法器控件、数据分配器控件以及和它们相连的导线；插入查找表（Lookup-Table）控件。在“Numeric Special Functions”控件面板中选中控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-19 所示；插入复平面到直角坐

标系（Lookup-Table）转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选中控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-20 所示。

（4）修改参数。

☺ 修改 BitsToInt 的参数，nBits=4，如图 17-21 所示；

☺ 修改查找表的值为：(−3, −3), (−1, −3), (3, −3), (1, −3), (−3, −1), (−1, −1), (3, −1), (1, −1),(−3,3), (−1,3),(3,3), (1,3), (−3,1), (−1,1), (3,1), (1,1)。

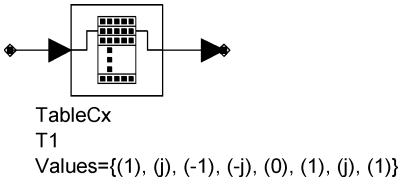


图 17-19　查找表控件

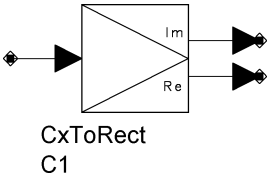


图 17-20　数据转换控件

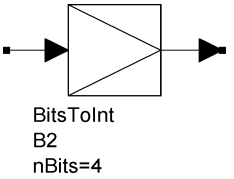


图 17-21　转换器

（5）电路连接：用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-22 所示。

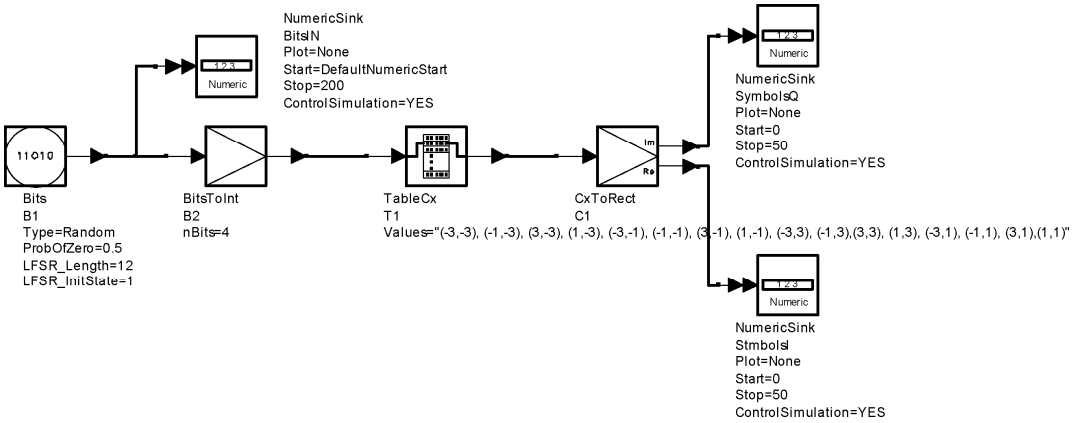


图 17-22　位到符号表的变换电路 2

（6）单击仿真按钮，仿真调试；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名 BitstoSymbolsb；插入以星座显示的矩形图，显示接收端数据“SymbolsI”和“SymbolsQ”，如图 17-23 所示。

（7）插入列表显示数据，如图 17-24 所示。

> 备注：与 17.2.1 节案例的结果比较，第一组 4 个位序列（0，1，1，0）映射的符号是（3，-1）而不是（-1，1），下一组 4 位序列（0，1，0，0）映射的符号是（-3，-1）而不是（-1，-3）。

17.2.3　信号类型

本节主要说明在 DSP Design 中如何使用各种各样的信号源类型，如浮点、定点、复数、整型、即时（timed）类型等。分别利用 4 个数字信号源和 2 个即时信号源产生相同的

常数值（0.3），对于每一种情况，源的输出可以直接由终端显示。

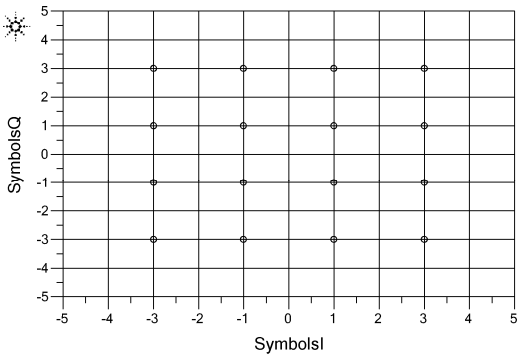


图 17-23　输出数据星座图 2

Index	BitsIN	Index	SymbolsI	SymbolsQ
0	0.000	0	3.000	-1.000
1	1.000	1	-3.000	-1.000
2	1.000	2	-3.000	1.000
3	0.000	3	-3.000	1.000
4	0.000	4	-1.000	3.000
5	1.000	5	-1.000	-3.000
6	0.000	6	-1.000	-3.000
7	0.000	7	1.000	-1.000
8	1.000	8	-3.000	3.000
9	1.000	9	1.000	-1.000
10	0.000	10	1.000	-1.000
11	0.000	11	-3.000	1.000
12	1.000	12	-1.000	1.000
13	1.000	13	1.000	1.000
14	0.000	14	1.000	1.000
15	0.000	15	1.000	3.000
16	1.000	16	-1.000	-3.000
17	0.000	17	-3.000	-3.000
18	0.000	18	3.000	-3.000
19	1.000	19	-3.000	3.000

图 17-24　输入、输出数据列表 2

（1）新建原理图，命名为 signaltypesA。

（2）插入数字信号源并设置参数，选择“Numeric Sources”控制面板，选择Const控件，放在原理图上的适当位置， Level=0.3，如图 17-25 所示；选择ConstFix控件，放在原理图上的适当位置，Level=0.3，OutoutPrecision=“1.2”，如图 17-26 所示；选择ConstCx控件，放在原理图上的适当位置，Real=0.3，Imag=0.3，如图 17-27 所示；选择ConstInt控件，放在原理图上的适当位置，Level=0.3，如图 17-28 所示。

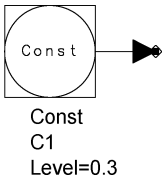


图 17-25　浮点信号源

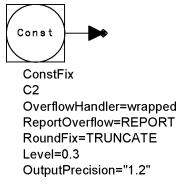


图 17-26　定点信号源

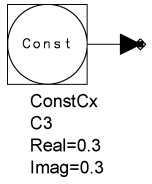


图 17-27　复数信号源

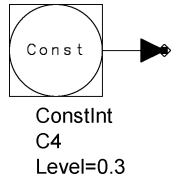


图 17-28　整数信号源

（3）插入即时信号源并设置参数，选择“Timed Sources”控制面板。选择Const控件，放在原理图上的适当位置，Value=0.3+j*0.3，FCarrier=0.0Hz，如图 17-29 所示。选择Const控件，放在原理图上的适当位置，Value=0.3+j*0.3，FCarrier=1.0Hz，如图 17-30 所示。当载波信号频率 FCarrier=0.0Hz 时，产生常数实值基带信号；当载波信号频率 FCarrier=1.0Hz 时，产生复数值 RF 信号。

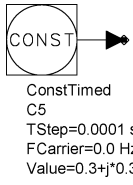


图 17-29　载波为 0 的即时信号源

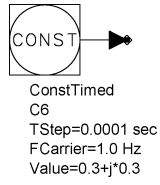


图 17-30　载波为 1Hz 的即时信号源

（4）插入并连接接收端。在“Sinks”控制面板中插入 4 个控件，重新命名，并和上面 4 个数字信号源连接；插入 2 个控件，重新命名，并和上面 2 个即时信号源连接，如图 17-31 所示。

（5）插入数据流仿真控制器。在“Controllers”控件面板中选取控件，参数单位由

“usec”设置为“msec”，如图 17-32 所示。

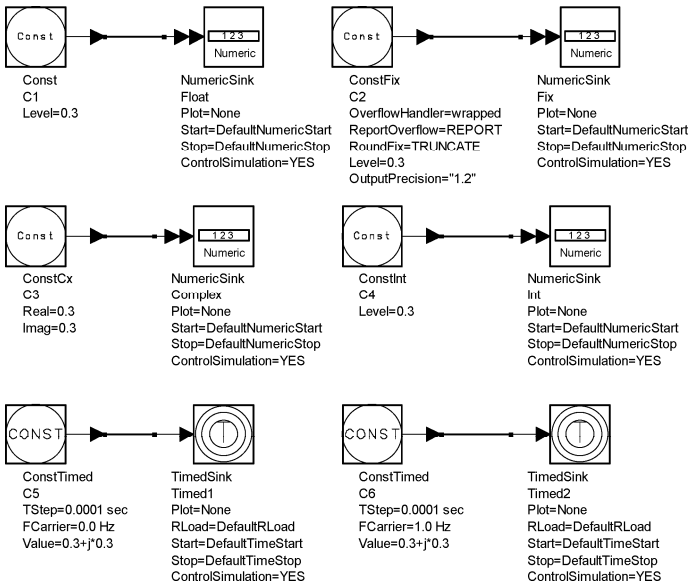


图 17-31　信号源仿真原理图

当运行仿真时，数字源产生 100 个输出采样，对于每一个数字源，将会产生 100 个数据点。仿真使用的即时源时间从 0～100ms，每 0.1ms 间隔产生一个数据，默认的 Stop 时间设置为 100，单位为 msec；即时源的 TStep（0.000 1s）参数作为采样间隔。根据上述设置得到即时模块存储 1 000 个数据点，计算公式：

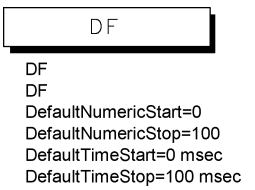


图 17-32　数据流仿真控制器

(DefaultTimeStop–DefaultTimeStart)×(DefaultTimeUnit)/TStep= (100–0)(msec)/0.000 1sec=1 000

结束时间和步长设置不同，会得到不同的点数和存储不同的数据。

（6）单击仿真按钮，仿真调试结束后，打开一个新的数据显示窗口，在原理图窗口的菜单栏中选择【Window】→【New Data Display】；选择默认数据名 signaltypesA 对数字源数据插入一个叠加的矩形图，显示出浮点和定点源的输出图像，设置坐标，取消 *x* 轴和 *y* 轴坐标的自动设置，*x* 轴坐标设置为 0～10，步长为 1，*y* 轴坐标设置为 0～0.5，步长设置为 0.1，如图 17-33 所示。

> 备注：浮点源的输出值为 0.3，定点源的输出值为 0.25（因为 3 位量化值中，1 位是符号位，2 位是值）。

（7）对数字源数据插入一个叠加的矩形图，显示出复数的实部和虚部以及整型的数据图像，设置坐标，取消 *x* 轴和 *y* 轴坐标的自动设置，*x* 轴坐标设置为 0～10，步长为 1，*y* 轴坐标设置为 0～0.5，步长设置为 0.1，如图 17-34 所示，这个整型数据的值在 0～0.3 之间，比 1 小。

（8）查看浮点和定点值之间的不同。插入一个方程来看它们之间的区别。可以写出方程的完整路径为 Err=(SignalTypesA.DF1.DF.Float) – (SignalTypesA.DF1.DF.Fix)。如果默认数据集在当前数据显示窗口，如果例化名 Float 和 Fix 用于接收端，方程可以简化成：

Err=Float–Fix，如图 17–35 所示。

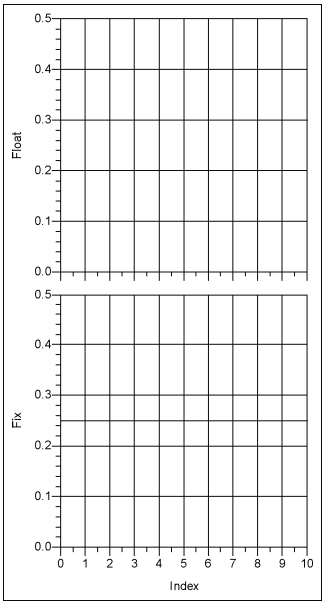


图 17–33　浮点和定点源图像

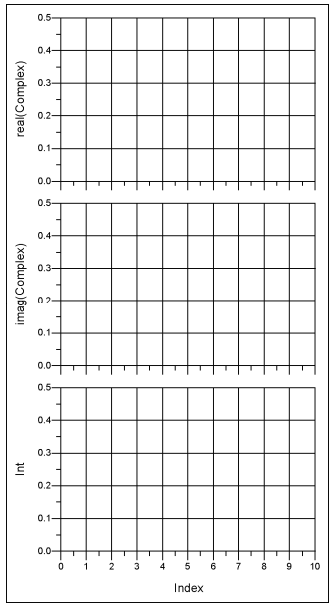


图 17–34　复数的实部和虚部及整数信号源图像

Eqn Err=Float-Fix

图 17–35　误差方程

浮点、定点及误差数据如图 17–36 所示，误差图像如图 17–37 所示。

Index	Float	Fix	Err
0	0.300	0.250	0.050
1	0.300	0.250	0.050
2	0.300	0.250	0.050
3	0.300	0.250	0.050
4	0.300	0.250	0.050
5	0.300	0.250	0.050
6	0.300	0.250	0.050
7	0.300	0.250	0.050
8	0.300	0.250	0.050
9	0.300	0.250	0.050
10	0.300	0.250	0.050

图 17–36　浮点、定点及误差数据

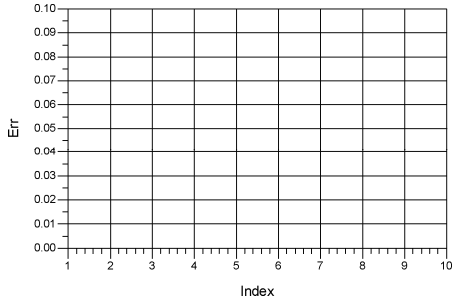


图 17–37　误差图像

（9）对定点源用不同的精度值。

☺ 16-bit 精度：OutputPrecision=1.15，再一次运行仿真结果表示的是 16-bit 精度值，输出更接近 0.3，且误差小于 5×10^{-7}。

☺ 24-bit 精度：OutputPrecision=1.23，再一次运行仿真结果表示的是 24-bit 精度值，误差接近 5×10^{-8}。

（10）对即时源数据插入一个叠加的矩形图，显示其输出图像。设置坐标，取消 *x* 轴和 *y* 轴刻度的自动设置，*x* 轴坐标设置为 0～10，步长为 1，*y* 轴坐标设置为 0～0.5，步长设置为 0.1，如图 17–38 所示。

（11）插入即时源数据列表，如图 17-39 所示。

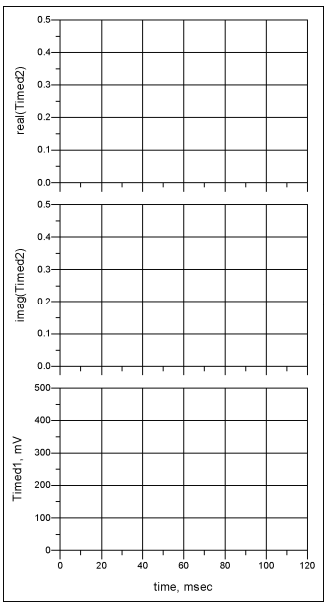


图 17-38　即时源图像

time	Timed1	Timed2
0.0000 sec	300.0 mV	0.424 / 45.000
100.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
200.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
300.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
400.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
500.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
600.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
700.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
800.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
900.0 usec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.000 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.100 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.200 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.300 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.400 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.500 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.600 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.700 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.800 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
1.900 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.000 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.100 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.200 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.300 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.400 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.500 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.600 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.700 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.800 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000
2.900 msec	300.0 mV	0.424 / 45.000

图 17-39　即时源数据列表

对于所有的数字源图像，有 100 个数据点且每一个数据点都是一个独立的索引值，数字信号的采样率与这些数据点无关，仅仅简单地表示成采样 1、采样 2、采样 3 等。这 100 个点的值是由数据流控制器组件 DF 的 DefaultStop 参数确定的。即时源的采样率与数据的点数有关，第 n 点的采样出现在 n*TStep 时刻，TStep 是采样周期。对于即时源 x 轴表示的都是时间。载波频率不同，即时源的信号输出是不同的，如载波频率为 1Hz 输出的是 RF 信号，另一个是基带信号。其中 Timed(1)=0.3，Timed(2)=$0.3\cos(2\pi t)$ $-0.3\sin(2\pi t)$。

17.2.4　数据流仿真的方法

与电路仿真器对全部电路的分析设计不同，如在谐波平衡仿真应用基尔霍夫定律，数据流仿真分析的对象是序列，不同元素的分析是按一定顺序进行的，一个时刻对应一个元素。

在数据流仿真中，对于仿真器参数的设置和电路本身的设计以及不同的元素工作都会影响仿真的时间。在接下来的案例中，电路组件工作序列的顺序依赖的是所使用组件的类型。

1．采样率不一致问题

当两个数据流要组合在一起时，需要使用加法器或乘法器，同时这两路数据必须以相同的速率传输数据，当速率出现不同时，我们把它称为采样率不一致问题。

（1）新建原理图，命名为 SamplingRate。

（2）插入二进制随机数控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-40 所示。

（3）插入数据分配器。在“Numeric Control”控件面板中选取控件，放到原理图适

当位置，参数默认即可，如图 17-41 所示。

（4）插入 2 个位到整数转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，一个 nBits 参数修改为 2，一个 nBits 参数修改为 4，如图 17-42 和图 17-43 所示。

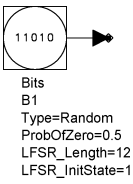


图 17-40　二进制随机数信号源

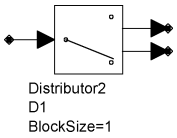


图 17-41　数据分配器

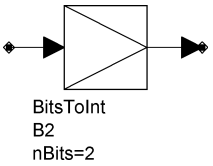


图 17-42　参数为 2 的转换器

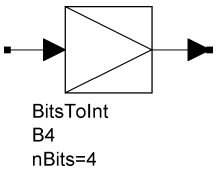


图 17-43　参数为 4 的转换器

（5）插入多输入加法器控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-44 所示。

（6）插入数字接收端。在“Sinks”控件面板中选取控件，插入一个输入接收端和一个输出接收端，放到原理图适当位置，参数设置如图 17-45 和图 17-46 所示。

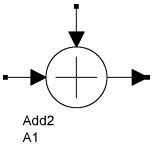


图 17-44　多输入加法器控件

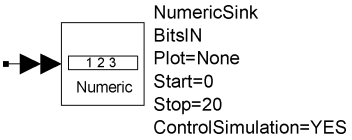


图 17-45　输入信号数字接收端

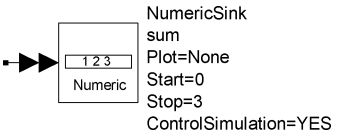


图 17-46　加和后数字接收端

（7）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-47 所示。

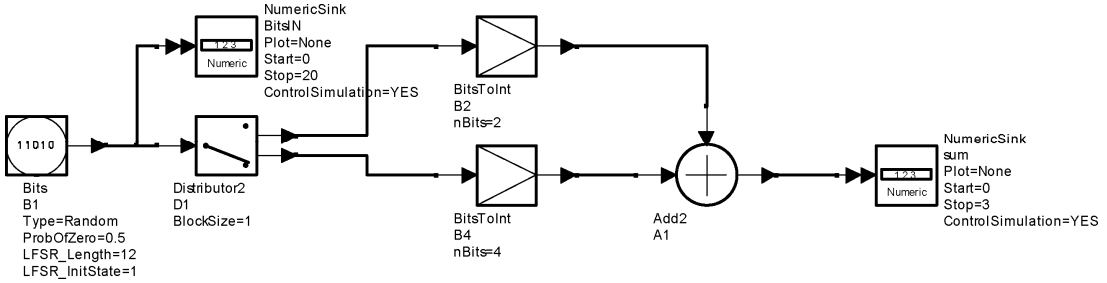


图 17-47　电路原理图

（8）插入数据流仿真控制控件。在“Controllers”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-48 所示。

（9）运行仿真会弹出错误信息，如图 17-49 所示。

这是由于在上方的 BitsToInt 组件 B2 与下方的组件 B4 它们产生的输出不同步，导致了 2 输入加法器组件不能产生输出，为了能够仿真运行 nBit 设置参数在这里必须一致。

（10）修改 nBit 参数，使之保持一致，仿真运行，错误信息就不再提示。

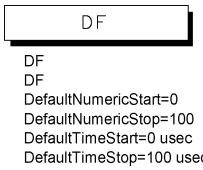


图 17-48　数据流仿真控制控件

```
Error detected by hpeesofsim during Ptolemy simulation initialization `DF'.
    `D1', `B2': The scheduler has detected a sample rate inconsistency at
    the listed components.
```

图 17-49　错误信息

2．死锁的解决

当反馈提供的数据和输入、输出组合时，必须在反馈环节加一个延时器或者一些初始数据，否则仿真不能执行，这种现象就称为死锁。下面是验证一个死锁的例子。

（1）新建原理图，命名为 Deadlock。

（2）插入正弦波发生器控件。在“Numeric Sources”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-50 所示。

（3）插入数据分配器件。在“Numeric Control”控件面板中选取、、控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-51～图 17-53 所示。

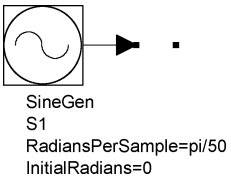


图 17-50　正弦波发生器

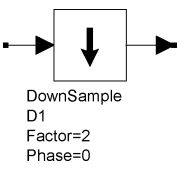


图 17-51　下采样器

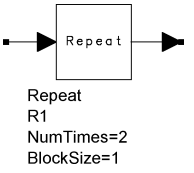


图 17-52　数据重发器

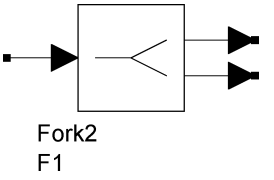


图 17-53　数据复制器

（4）插入延时器控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-54 所示。

（5）插入多输入加法器控件。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-55 所示。

（6）插入数字接收端。在“Sinks”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-56 所示。

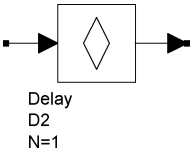


图 17-54　延时器控件

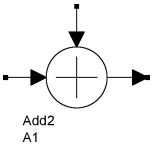


图 17-55　二输入加法器

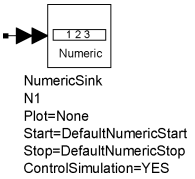


图 17-56　数字接收端

（7）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-57 所示。

（8）插入数据流仿真控制控件。在“Controllers”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-58 所示。

（9）运行仿真会弹出错误信息，如图 17-59 所示。

错误的主要原因是 Downsample（D1）的输入需要接收两个输入采样值，正弦信号发生

器可以工作两次，但是反馈仅仅有一次延时，因为这里延时器件的参数 *N*=1，当仿真开始时，在延时器件的输出端仅仅有一个输出，因为这个缓冲器件的初始值为 0。

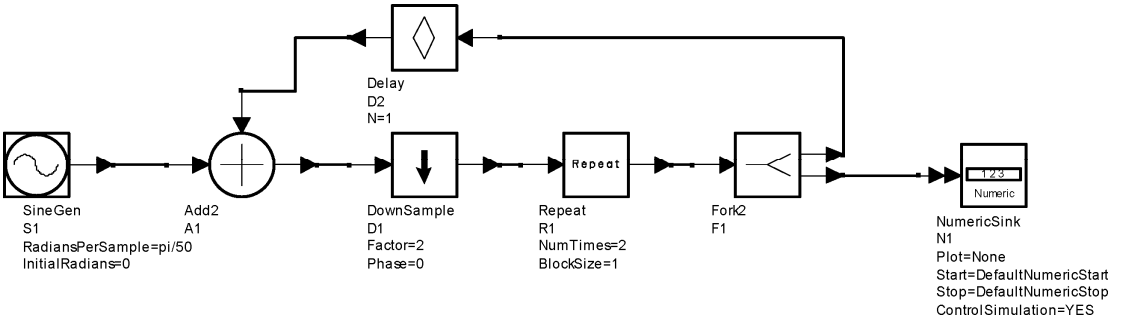


图 17-57　死锁电路原理图

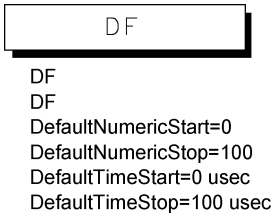


图 17-58　数据流仿真控制控件

```
Error detected by hpeesofsim during Ptolemy simulation initialization `DF'.
    `S1', `A1_A1', `D1', `R1', `N1', `F1': The listed components are
    deadlocked. To determine the actual loops that are the cause of the
    deadlock, change the DF DeadlockManager controller parameter to
    "IdentifyDeadlock". To automatically resolve the deadlocks by inserting
    tokens, change the DF DeadlockManager controller parameter to
    "ResolveDeadlock".
```

图 17-59　错误信息

（10）发现死锁环，改变数据流控制器 DF 的参数，把 DeadlockManager=Report Deadlock 改为 DeadlockManager=IdentifyDeadlock（双击 DF 控制器，打开“Display”选项卡，把 DeadlockManager 选中后，单击确定，然后直接在原理图上修改即可），通过该设置就可以找到死锁环。

（11）再一次运行仿真，弹出错误信息，如图 17-60 所示。

```
Warning detected by hpeesofsim during Ptolemy simulation initialization `DF'.
    A deadlock loop has been detected.  The error loop members are: A1 D1
    R1 F1
Warning detected by hpeesofsim during Ptolemy simulation initialization `DF'.
    `A1.A1', `D1', `R1', `F1': form a deadlock loop
Error detected by hpeesofsim during Ptolemy simulation initialization `DF'.
    Deadlocks!
```

图 17-60　错误信息

这个错误信息给出死锁环由哪些组件构成，图中 A1.A1 说明是死锁环的一部分，它包含了子网络组件，双击该信息，得到该子网络，如图 17-61 所示。

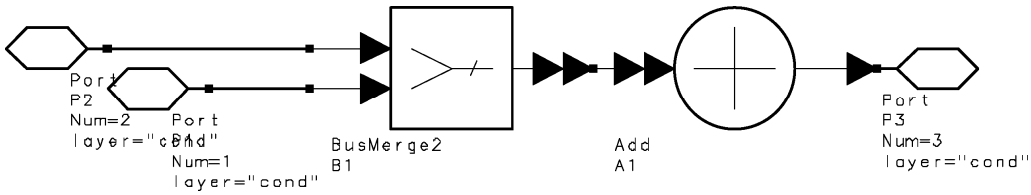


图 17-61　死锁部分子电路

（12）改变延时器件的参数，*N*=2，重新运行仿真，这时错误信息消失。

3．信号转换

当输入信号与设计信号的类型不一致时，除了从数字信号到模拟信号外，信号需要自动转换类型。因为采样率必须根据模拟的数据确定，数字数据不能自动转换成即时数据。

信号类型自动转换是比较方便的，但是在仿真过程中也可能产生不期望的结果。接下来列举一个信号自动转换的例子——复数值的标量输出。

（1）创建新原理图，命名为 SigConvA。

（2）插入正弦波发生器控件。在“Numeric Sources”控件面板中选取控件，参数的实部和虚部都设置为 1.0，如图 17-62 所示。

> 这个控件输出的箭头是绿颜色的，说明是复数输出。

（3）插入数据分配器件。在“Numeric Math”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，设置 Gain=2.0，如图 17-63 所示。

（4）插入两个数字接收端。在“Sinks”控件面板中选中控件，放到原理图适当位置，分别命名为 In 和 Out，参数默认即可，如图 17-64、图 17-65 所示。

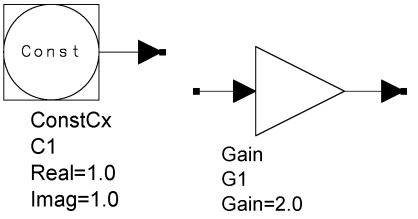


图 17-62　复数源

图 17-63　增益控件

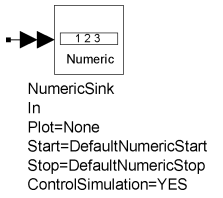


图 17-64　输入端数据接收器

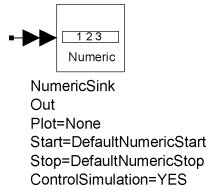


图 17-65　输出端数据接收器

（5）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-66 所示。

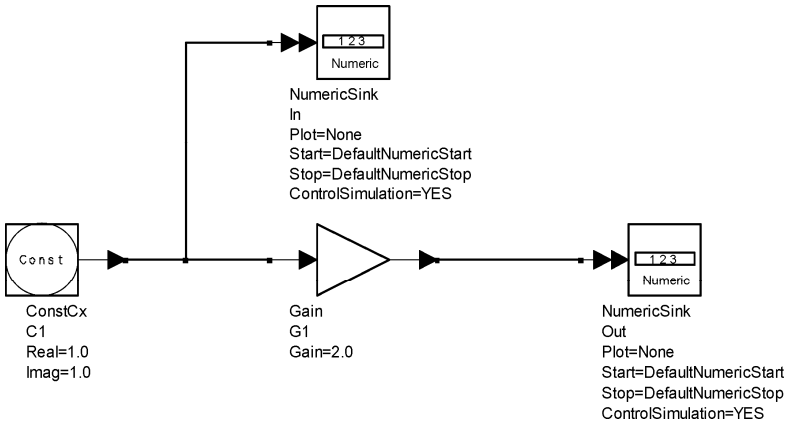


图 17-66　信号转换原理图

（6）插入数据流仿真控制控件。在“Controllers”控件面板中选取控件，参数默认即可，如图 17-67 所示。

（7）单击仿真按钮，仿真调试；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名

SigConvA；插入输入、输出数据列表，如图 17-68 所示。

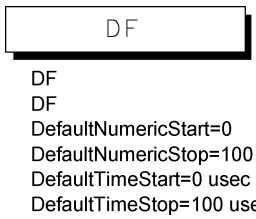


图 17-67　数据流仿真控制控件

Index	In	Out
0	1.000 + j1.000	2.828
1	1.000 + j1.000	2.828
2	1.000 + j1.000	2.828
3	1.000 + j1.000	2.828
4	1.000 + j1.000	2.828
5	1.000 + j1.000	2.828
6	1.000 + j1.000	2.828
7	1.000 + j1.000	2.828
8	1.000 + j1.000	2.828
9	1.000 + j1.000	2.828
10	1.000 + j1.000	2.828
11	1.000 + j1.000	2.828
12	1.000 + j1.000	2.828
13	1.000 + j1.000	2.828
14	1.000 + j1.000	2.828
15	1.000 + j1.000	2.828

图 17-68　输入、输出数据列表

> 输入的复数值是 1.000+j1.000，输出信号是实数值，且是输入源幅度的 2 倍。用复数增益组件代替整数增益控件，Gain=2.0+j*0.0。运行仿真，输入、输出这时都是复数值。

17.3　16QAM 调制/解调模块设计

17.3.1　理想升余弦滤波器特性

（1）创建新原理图，命名为 RaisedCosA。

（2）插入脉冲源。在“Numeric Sources”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-69 所示。

（3）插入升余弦滤波器。在“Numeric Communications”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数设置 Interpolation=1，Length=64，SymbolInterval=4，ExcessBW=0.3，如图 17-70 所示。

（4）插入数字接收端。在“Sinks”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-71 所示。

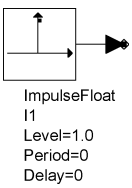


图 17-69　脉冲信号发生器

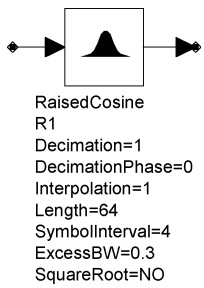


图 17-70　升余弦滤波器

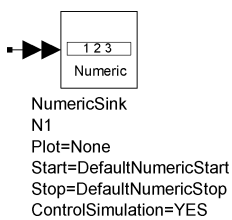


图 17-71　数字接收端

（5）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-72 所示。

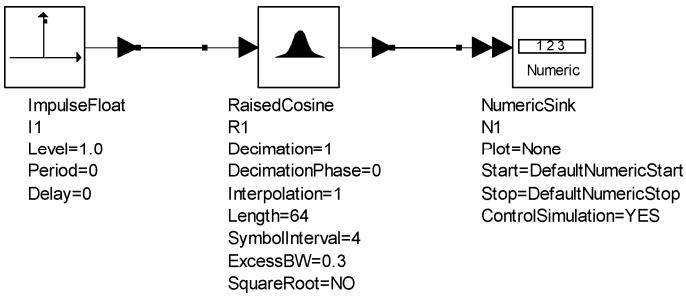


图 17-72　升余弦滤波器特性分析电路图

（6）插入数据流仿真控制控件。在“Controllers”控件面板中选取控件，参数 DefaultNumericStop=299，如图 17-73 所示。

（7）单击仿真按钮，运行仿真；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名 RaisedCosA；插入数据矩形图，显示结果如图 17-74 所示。

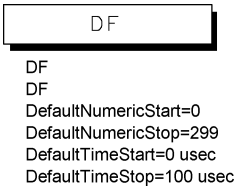


图 17-73　数据流仿真控制控件

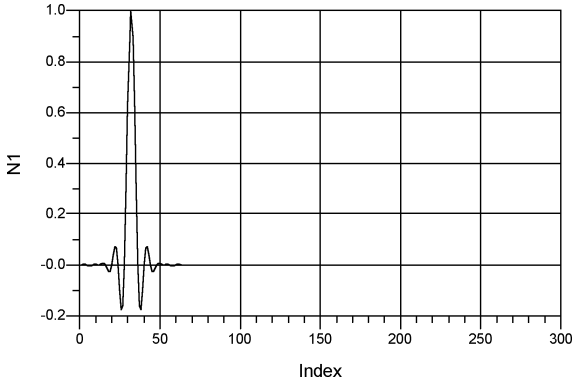


图 17-74　滤波器的输出特性

（8）插入输出数据列表，如图 17-75 所示。

（9）为便于观察，改变 x 轴设置范围为 0～64，步长为 4，如图 17-76 所示。

Index	N1
23	0.064
24	-2.738E-17
25	-0.098
26	-0.175
27	-0.158
28	3.580E-17
29	0.286
30	0.623
31	0.896
32	1.000
33	0.896
34	0.623
35	0.286
36	3.580E-17
37	-0.158
38	-0.175
39	-0.098
40	-2.738E-17
41	0.064
42	0.072
43	0.041
44	1.655E-17
45	-0.025

图 17-75　滤波器输出数据列表

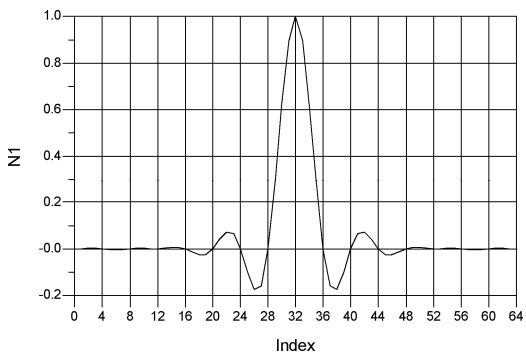


图 17-76　修改后滤波器输出特性

从图 17-76 中可以看出，脉冲响应在第 33 个点（Index=32）时取得最大值为 1，且图像关于该点对称。滤波器的脉冲响应从最大值向两侧每 4 个点有 1 个值为 0。

1．显示滤波器响应的 FFT

抑制频率响应可以通过使用 FFT 测试滤波器的输出，如果采样率已知，根据这个频率就可以计算出结果，步骤为：

（1）插入方程显示 FFT 的输出。方程为

Eqn H=fft(N1)

（2）插入矩形窗显示曲线，并插入一个标记点，找到阻带的抑制点，这个抑制点大致为 41dB，如图 17-77 所示。

滤波器脉冲响应的 FFT 图像中结果只有 150 个点。数据自身包含 300 个点，傅里叶变换也包含 300 个点，但是由于实数序列傅里叶变换的对称性，即 $X(f)=X(-f)$，所以仅仅有一半的点显示。

2．根升余弦滤波器

大部分应用中，在接收机和发射机端都会用到滤波器，升余弦滤波器一般在发射机端应用，而根升余弦滤波器在接收机端和发射机端都会用到。

（1）改变升余弦滤波器的参数，将 SquareRoot=NO 改为 SquareRoot=YES，这时升余弦滤波器就变为根升余弦滤波器。

（2）运行仿真，仿真结果如图 17-78 所示。

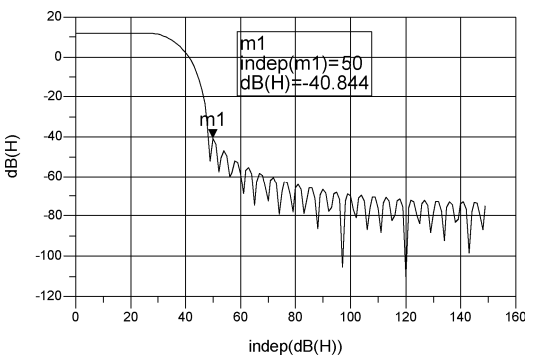


图 17-77　FFT 输出

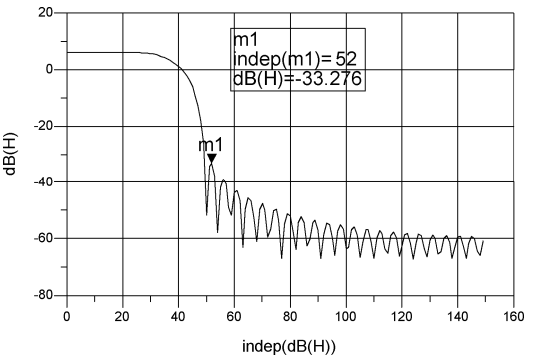


图 17-78　根升余弦滤波器 FFT 输出

（3）将第（1）步修改的滤波器参数再修改过来。

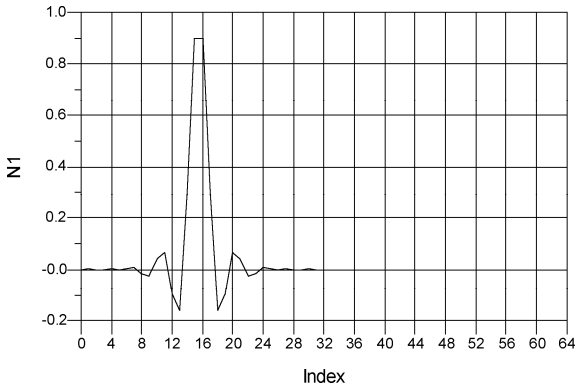
3．抽取和内插

抽取和内插是改变采样率的两项关键技术，这两项关键技术在 ADS2012 中用“Numeric Control”库中的“upsampler”和“downsampler”来实现。

【抽取】

（1）改变升余弦滤波器的参数，将 Decimation=1 改为 Decimation=2，表示输出的结果每 2 个点出现一次。

（2）运行仿真，仿真结果如图 17-79 所示。



Index	N1
14	0.286
15	0.896
16	0.896
17	0.286
18	-0.158
19	-0.098
20	0.064
21	0.041
22	-0.025
23	-0.014
24	0.006
25	0.002
26	0.001
27	0.002

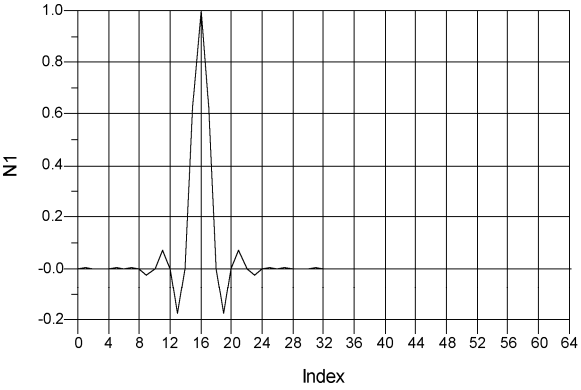
图 17-79　抽取后的仿真结果

🕮 输出的结果点数少了一半，尽管滤波器的特性没有改变，但是在 32 点之后输出值均为 0。同时也注意到脉冲响应的最大值出现在 Index=15 和 16 两点，大小为 0.896（原始值为 1）。原始的仿真结果 0.896 出现在 Index=31 和 33 点，最大值只有 1 个，而不是 2 个。

【设置抽取相位】

（1）改变升余弦滤波器的参数，将 DecimationPhase=0 改为 DecimationPhase=1。

（2）运行仿真，仿真结果如图 17-80 所示。



Index	N1
14	3.580E-17
15	0.623
16	1.000
17	0.623
18	3.580E-17
19	-0.175
20	-2.738E-17
21	0.072
22	1.655E-17
23	-0.026
24	-6.625E-18
25	0.005
26	8.951E-34
27	0.003

图 17-80　改变相位后的抽取结果

🕮 输出的点数仍为 32 个，输出的最大值出现在 Index=16 处，最大值为 1。

（3）升余弦滤波器的参数改为默认值，运行仿真再保存。

【内插】

（1）改变升余弦滤波器的参数，将 Interpolation=1 改为 Interpolation=4，这会使两个数据点之间插入 3 个数据点，如图 17-81 所示。

（2）运行仿真，因为输入是单个脉冲，内插没有生效，所以输出同 Interpolation=1 结果一致。

（3）把输入脉冲源改成 bit 源，在“Common Components”控制面板中选择控件，放在原理图中的适当位置，参数默认即可，如图 17-82 所示。

（4）运行仿真，因为输入给滤波器的是 bit 流信息，所以数据的 FFT 显示没有任何意义，这时可以用眼图代替矩形图。

（5）插入一个方程，如图 17-83 所示。

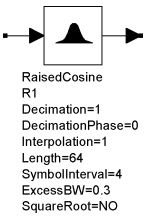


图 17-81 升余弦滤波器

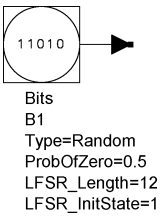


图 17-82 随机信号发生器

Eqn eye1 = eye_t(N1, 0.25, 2)

图 17-83 眼图方程

N1：表示接收源；

0.25：符号率，是内插符号数的倒数；

2：数据 2 倍采样。

（6）插入矩形图。数据源选择Equations，添加“eye1”变量，显示眼图。为了便于观察，修改 *x* 轴取值范围为 0～8，步长为 0.5，如图 17-84 所示。

（7）改变滤波器的参数，将 Interpolation=4 改为 Interpolation=1，即不使用内插功能。

（8）运行仿真，如图 17-85 所示，发现眼图是不相干的，主要是因为升采样需要数据率和采样率相同。

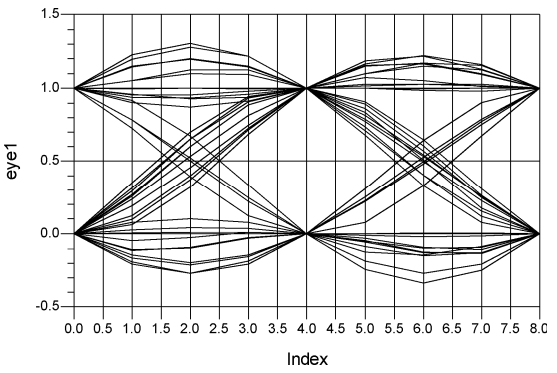


图 17-84 眼图数据

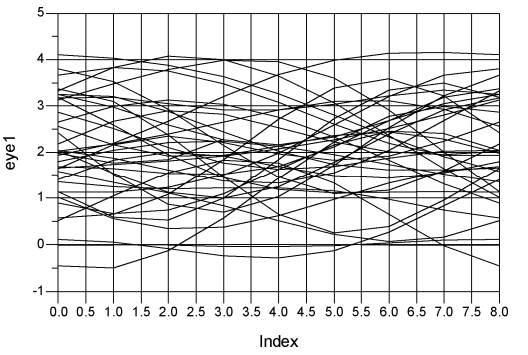


图 17-85 Interpolation 参数修改后的失真眼图数据

17.3.2 设计一个数字调制器

该数字调制器是用数字的方法把 16QAM 基带信号转换成中频信号，位转换成符号，滤波器使用的是升余弦滤波器，相乘后利用升采样器把信号转换为中频信号。

位到符号转换与 Gray 码转换相同，复数升余弦滤波器采用 Nyquist 滤波方法减小了带宽，这个滤波器的子电路包含信号的实部和虚部两部分。

复指数信号由一个正弦信号和余弦信号发生器产生，分别代表复指数信号的实部和虚部，信号的实部通过数模转换可以用于即时 RF 部件和发射机的输入信号。

（1）创建新原理图，命名为 Modulator。

（2）插入位源。在“Common Components”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-86 所示。

（3）插入位到整数转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，nBits 参数修改为 4，如图 17-87 所示。

（4）插入查找表（Lookup-Table）控件。在“Numeric Special Functions”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，如图 17-88 所示。

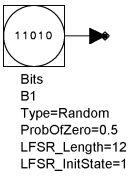


图 17-86　二进制随进信号发生器

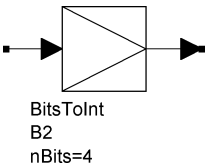


图 17-87　转换器

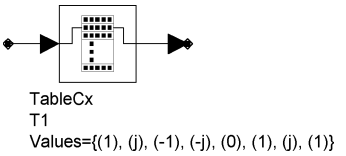


图 17-88　查找表控件

修改查找表的值为：(−3, −3), (−1, −3), (3, −3), (1, −3), (−3, −1), (−1, −1), (3, −1), (1, −1), (−3, 3), (−1, 3), (3, 3), (1, 3), (−3, 1), (−1, 1), (3, 1), (1, 1)。

（5）插入升余弦滤波器。在“Numeric Communications”控件面板中选中控件，放到原理图适当位置，参数设置为 Interpolation=6，SymbolInterval=6，ExcessBW=0.3，SquareRoot=YES，如图 17-89 所示。

（6）插入两个正弦信号发生器。在“Numeric Sources”控件面板中选中控件，放到原理图适当位置，其中一个正弦信号发生器的参数设置为 RadiansPerSample=0.3*pi，InitialRadians=pi/2，另一个正弦信号发生器的参数设置为 RadiansPerSample=0.3*pi，InitialRadians=0，如图 17-90 和图 17-91 所示。

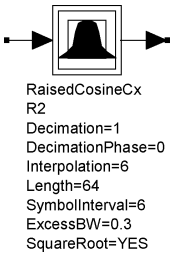


图 17-89　升余弦滤波器

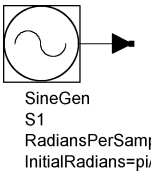


图 17-90　初值为 pi/2 的正弦信号发生器

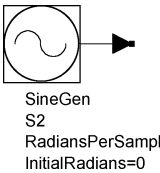


图 17-91　初值为 0 正弦信号发生器

（7）插入信号转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-92 所示。

（8）插入复数乘控件。在“Numeric Math”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-93 所示。

（9）插入信号转换控件。在“Signal Converters”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-94 所示。

（10）插入 3 个数字接收端。在“Sinks”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，分别命名为 CmplxBBOut、CmplxIFout 和 RealOut，如图 17-95～图 17-97 所示。

（11）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤的器件连接起来，

如图 17-98 所示。

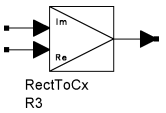


图 17-92 信号转换控件 1

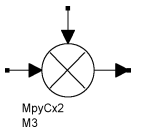


图 17-93 复数 2 输出乘法器

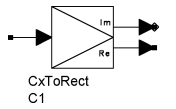


图 17-94 信号转换控件 2

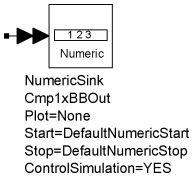


图 17-95 CmplxBBOut 数字接收端

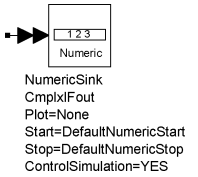


图 17-96 CmplxIFout 数字接收端

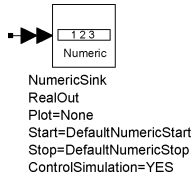


图 17-97 RealOut 数字接收端

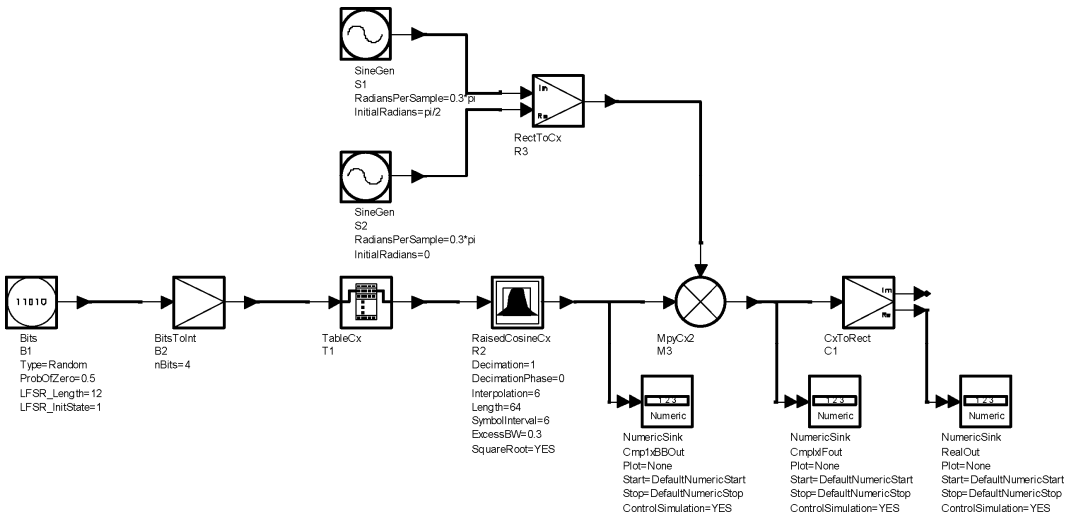


图 17-98 调制电路图

（12）插入数据流仿真控制控件。在“Controllers”控件面板中选中DF控件，参数默认即可，如图 17-99 所示。

（13）单击仿真按钮，仿真调试；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名Modulator；插入方程显示基带信号和中频信号频谱。把 3 个数字接收端作为数据观察点，插入 3 个方程，如图 17-100 所示。

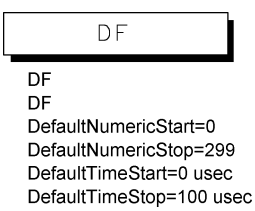


图 17-99 数据流仿真控制控件

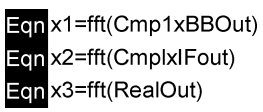


图 17-100 插入方程

（14）根据这 3 个方程，插入 3 个矩形图，仿真结果如图 17-101 所示。

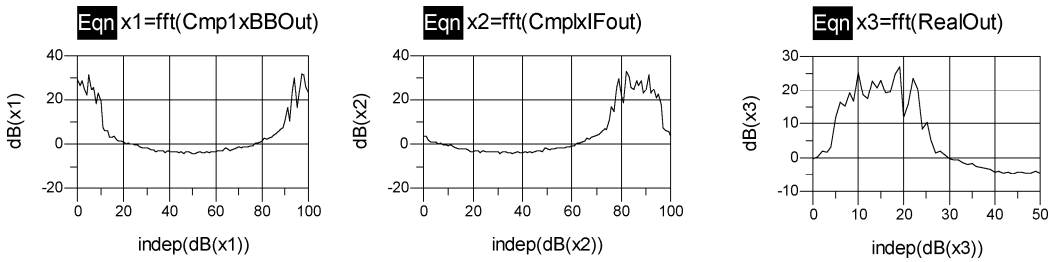


图 17-101　仿真结果

> 📖 CmplxIFout 的频域幅度与 RealOut 的频谱幅度是不同的，RealOut 的频谱幅度比 CmplxIFout 的频域幅度小 3dB。这是因为信号 CmplxIFout 包括实部和虚部两部分能量，而信号 RealOut 只包含信号的实部能量。

17.3.3　设计一个数字解调器

解调器由一个 3MHz 的复指数信号、根升余弦滤波器及降采样器组成。

（1）新建原理图，命名为 DEModulator。因为解调器是调制器的逆过程，很多器件重复使用，这里不一一复述如何添加器件，本案例的做法是把 Modulator 原理图复制一份进行修改，需要重点修改的参数是正弦信号发生器初始值由 pi/2 改为-pi/2，升余弦滤波器参数 Interpolation=1，数据接收端重新命名为 RxMultout、RxFiltOut、RxDownSampleOut，修改后的电路如图 17-102 所示。

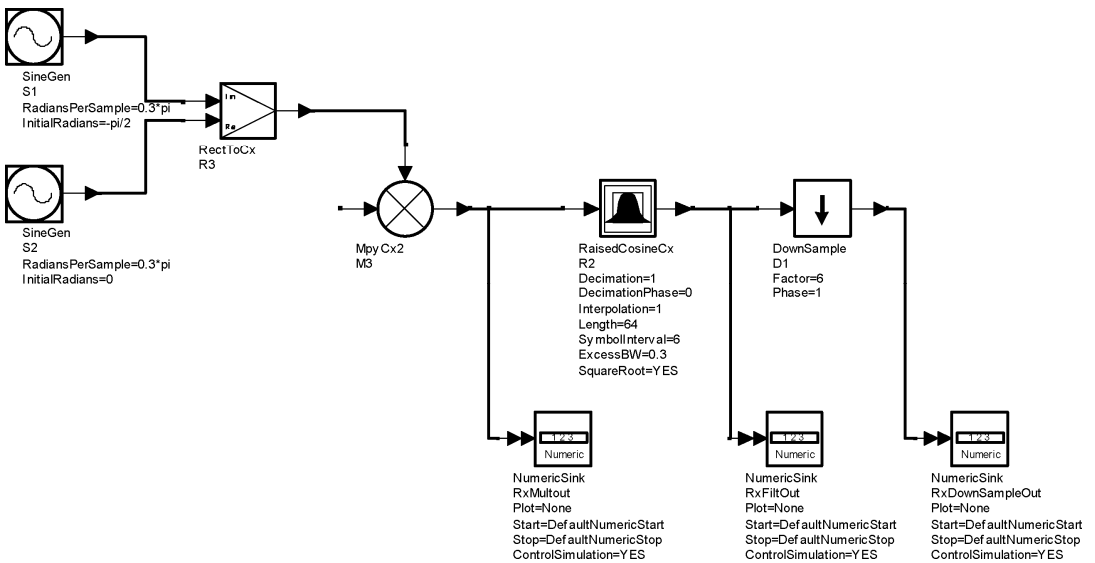


图 17-102　解调原理图

（2）把调制模块和解调模块连接在一起，调制模块的输出作为解调模块的输入，禁用调制模块的 C1（主要是为了验证调制模块），如图 17-103 所示。

（3）单击仿真按钮，仿真调试；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择

【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名 DEModulator；插入方程显示基带信号和中频信号频谱。把 3 个数字接收端作为数据观察点，插入 3 个方程，如图 17-104 所示。

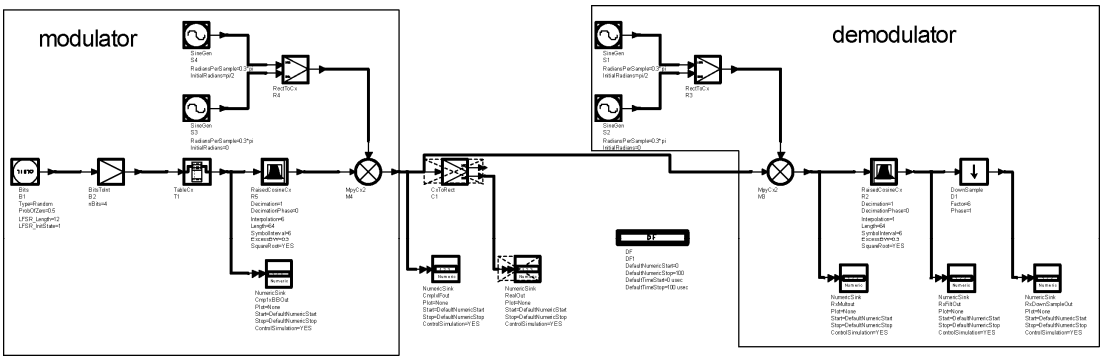


图 17-103　调制/解调电路图

Eqn x1=fft(Modulator..CmplxIFout)
Eqn x2=fft(RxMultout)
Eqn x3=fft(RxFiltOut)

图 17-104　插入方程

（4）根据这 3 个方程，插入 3 个矩形图，仿真结果如图 17-105 所示。

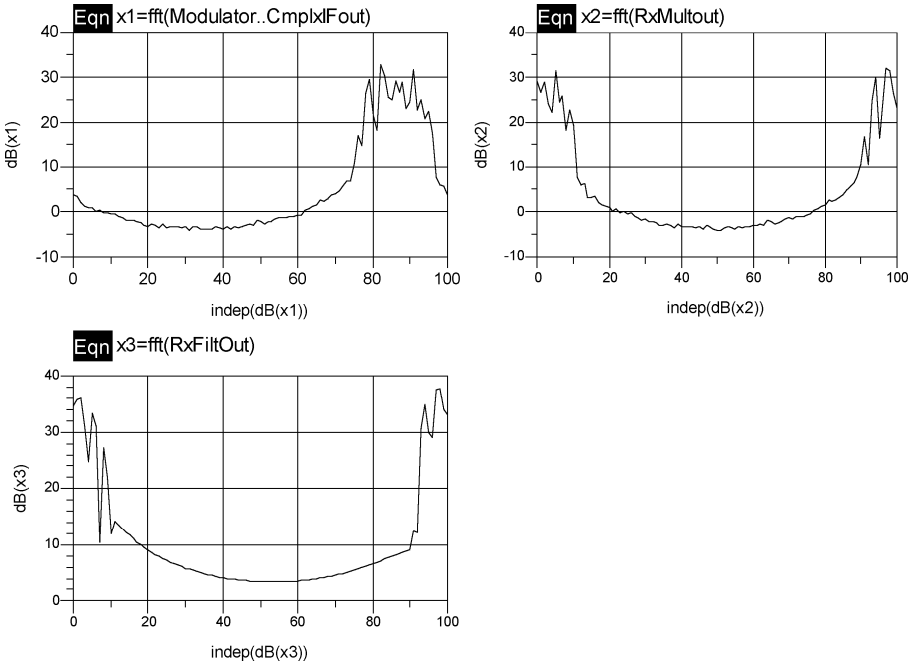


图 17-105　仿真结果

（5）显示 RxDownSampleOut 的星座图。在数据显示窗口插入一个矩形图，在弹出的菜单中选择 DEModulator 标签，选择 RxDownSampleOut 变量，单击 >>Add Vs...>> 按钮。在弹

出的复数数据对话框中选择 Imaginary part，单击 OK 按钮；接着会弹出显示独立变量的对话框，选择 RxDownSampleOut 变量，单击 OK 按钮，在弹出的复数数据对话框中选择 Real part，单击 OK 按钮；选择“Trace Option”选项卡，选择显示类型为“Scatter”，单击 OK 按钮，得到星座图；改变 *x* 轴和 *y* 轴的坐标范围，都设置为-5～5，步长设置为 1，单击 OK 按钮，如图 17-106 所示。

（6）改变降采样器的相位，如 Phase 参数可以设置为 2、3、4、5 等，如图 17-107 所示。

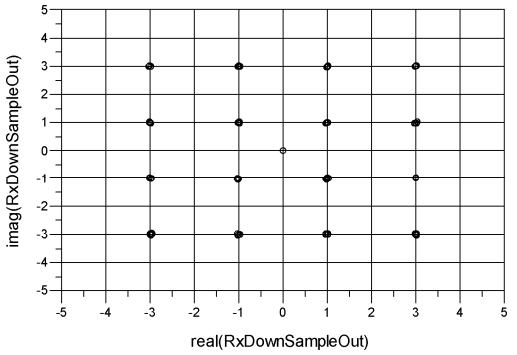


图 17-106　RxDownSampleOut 的星座图

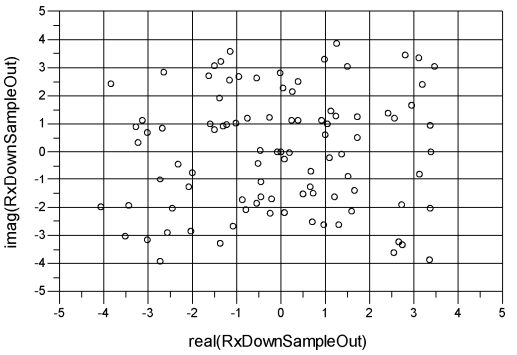


图 17-107　修改参数后的星座图

> 降采样器的相位只要不为 1，星座图就会被破坏，原因是只有在这个值的输出信号的相位降采样时，眼图打开最大，换句话说，采样的时间必须正确。

17.3.4　噪声和失真的影响测试

在接收端和发射机之间插入噪声源。

（1）新建原理图，命名为 zaoshengjiance。

（2）把上一个案例的原理图复制到该原理图中。

（3）插入复数加法控件。在“Numeric Math”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数默认即可，如图 17-108 所示。

（4）插入高斯噪声源。在“Numeric Sources”控件面板中选取控件，放到原理图适当位置，参数 Variance=0.01，如图 17-109 所示。

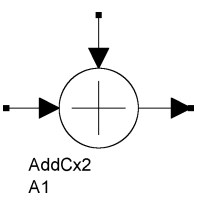


图 17-108　复数加法控件

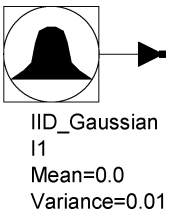


图 17-109　高斯噪声源

（5）电路连接。用连线工具图标或快捷键“Ctrl+W”把上面步骤中的器件连接起来，如图 17-110 所示。

（6）单击仿真按钮，仿真调试；仿真结束后，在原理图窗口的菜单栏中选择

【Window】→【New Data Display】，打开新的数据显示窗口；选择默认数据名 zaoshengjiance；插入矩形图，重新显示“RxDownSampleOut”星座图，可以观察到加入噪声对它的影响，如图 17-111 所示。

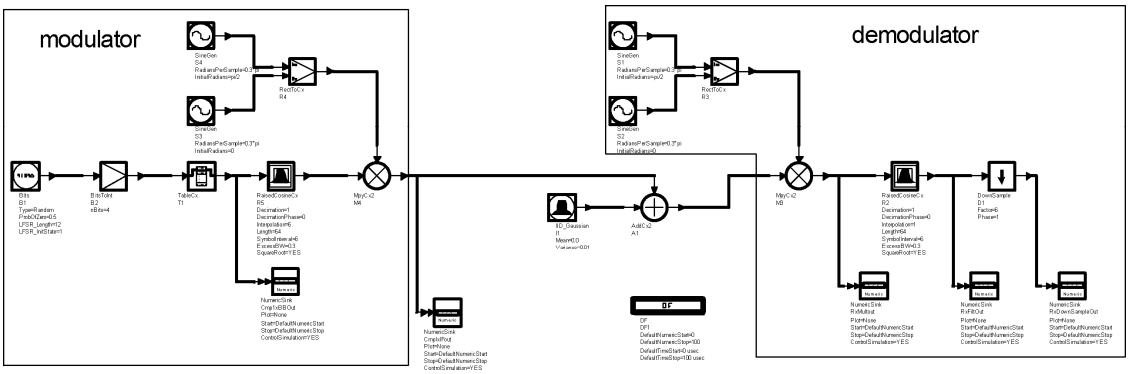


图 17-110　加入噪声的调制/解调电路图

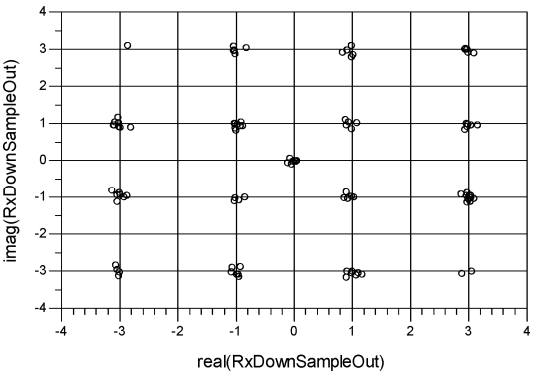


图 17-111　引入噪声的星座图

17.4　思考题

（1）定点源采用 24-bit 精度时，分析其误差，并与本章例子作具体的比较。

（2）通过软件仿真分析数字调制/解调电路中滤波器的输入与输出之间的信号传输延时。

（3）当传输信道中引入高斯白噪声时，星座图会发生哪些变化？试着仿真实现。

第 18 章　W-CDMA/3GPP 通信系统设计

移动通信在经历了两代发展之后，第三代移动通信技术（3G）已经成熟并开始商用。3G 的目标是为用户提供质量更佳的移动语音、宽带移动数据和移动多媒体业务，提供更大的系统容量和更高的频谱利用率，满足人们对通信个性化的需求。为了适应移动数据业务和多媒体业务的发展，3G 核心网络也在随之不断地演进。毫无疑问，新一代移动核心网络将凭借其先进的网络架构及技术，确保快速、高质量地提供语音、数据及多媒体业务。

W-CDMA、CDMA2000 和 TD-SDMA 是国际第三代移动通信技术的三大主流标准。W-CDMA 是基于 GSM/GPRS 基础演进而来的，并且由于 GSM 和 GPRS 网络的普及程度以及 WCDMA 自身的特点而得到了广泛的支持和应用。本章主要介绍基于 W-CDMA 的 3GPP 核心技术，并利用 ADS 完成 W-CDMA/3GPP 通信系统的仿真。



18.1　3GPP 关键技术概述

随着数据业务的飞速发展，数据接入的可移动性要求不断突现，支持高带宽、可移动无线数据接入的第三代移动通信技术浮出水面。第三代移动通信系统 IMT-2000 是国际电信联盟在 1985 年提出的，当时称为未来公共陆地移动电话系统，1996 年正式更名为 IMT-2000。与现有的第二代移动通信系统相比，其主要特点可以概括为：全球普及和全球无缝漫游；具有支持多媒体业务的能力，特别是支持 Internet 的能力；便于过渡和演进；高频谱利用率；能够传送高达 2Mbps 的高质量图像。

3G 标准化组织主要有 3GPP 和 3GPP2，以 CDMA 技术为核心。国际上第三代移动通信技术的主流标准有三种，它们分别是 CDMA2000、W-CDMA 和 TD-SCDMA。W-CDMA 和 TD-SCDMA 是由 3GPP 组织制定的，而 CDMA2000 是由 3GPP2 制定的。W-CDMA 标准目前已经有四个版本，即 Release 99（简写为 R9）、R4、R5 和 R6，以及正在制定的 R7；CDMA2000 在向 3G 技术演进上出现两个方向，CDMA20001x 的升级版本 CDMA20001x EV-DV（版本 C、D）和支持数据业务的 CDMA20001x EV-DO。TD-SCDMA 标准目前采用的是中国无线通信标准组织制定的 TSM 标准。

18.1.1　3G 通信网络发展趋势及特点

1．发展趋势

【宽带化】宽带化体现为对无线传输能力的要求。3G 系统要求能够支持高达 2Mbps 的传输速率。随着新型多媒体业务的发展、话务量的提升等，对 3G 系统及下一代无线网络的无线传输速率要求会越来越高，即宽带化是 3G 网络的基本发展趋势之一。

【网络融合】为了保护 2G 网络投资，降低 3G 网络业务运营的风险，在 3G 标准的

制定中，要求考虑从多种标准的 2G 网络向 3G 网络的平滑演进。为了实现移动业务与固网业务的融合，实现业务无缝覆盖和多种网络资源共享，降低业务运营和网络维护成本，在 3G 标准制定中，要求考虑 3G 网络与固网互通问题。尽管目前存在多种 3G 技术标准，但不同 3G 技术标准网络之间，以及各种 3G 技术标准网络与固网之间的互通仍需逐步解决。

2．特点

【全 IP 的核心网络】核心网采用 IP 交换机制，其主要目标是采用基于 IP 组网的传输技术，以方便设备的部署，节省建网投资；将信令控制与业务处理分离，便于业务的升级，扩大应用范围；用媒体网关和信令网关完成与传统网络的隔离和互通；系统内部的拓扑结构、安全性等对外部网络而言是不可见的，外部网络实体对其不产生干扰；在具备流量工程保证环境的条件下，使用以太网交换机和路由器，使整个系统的技术和经济性与国际最新水平同步，并不断提高。

【智能化的网元】3G 的智能网可以是从 2G 的智能网演进而来的，3GPP 在制定协议时已经最大可能地重用传统的 2G 智能网协议，这样可以降低建设成本。对于 CSE，只需做较少的改进就可以在 3G 全 IP 网络中支持传统的智能业务，如预付费、VPN 等，当然，CSE 需要提供基于 IP 的 CAP/TCAP。

在 3G 网络中，智能网的功能分布在各个网元中，各网元具有 SSP 功能。对于 2G 的网元（如 2G 的 MSC），可以通过升级的方式使其具有 SSP 功能，对于 3G 的网元，在网络的建设初期就应该考虑到智能应用。

在构成 3G 的核心网络中，SGSN 应具有 GPRSSSSF 功能，CSCF 应具有 softSSF 功能。可以说，智能网功能可以看作 3G 核心网一个不可分割的部分。

【核心网络与业务分离】3G 的业务可以由第三方运营商或厂家来提供，它通过将自己的业务服务器与 3G 核心网相连接以便向用户提供 3G 新业务。终端可以从第三方运营商的业务服务器下载业务应用程序，以便使用所提供的业务。由于 3G 核心网与业务是分离的，所以 3G 可以为用户提供各类丰富的、极具个性化的业务。

18.1.2 3G 主流标准概述

2000 年 5 月，ITU 在土耳其召开全会，经对 IMT-2000 无线接口技术标准的 10 个候选方案的频谱效率、网络接口、Qos、技术复杂性、覆盖率、灵活性和设备体积等诸多方面的全面评估，正式确认了五种标准，分别是 MS-CDMA、DS-CDMA、TD-CDMA 和 SC-TDMA、MC-TDMA，这是一个以 CDMA 技术为主体，兼顾 IDMA 技术，包含 FDD 和 TDD 两种双工方式的多元化体系标准。

从移动通信技术发展趋势和可实现业务功能分析，基于 CDMA 制式的三种标准被普遍看好，分别对应 W-CDMA、CDMA2000 和 TD-SCDMA 三种技术，它们被认为是 3G 的三大主流应用技术标准。

1．W-CDMA

W-CDMA 的主要技术指标是：支持高速数据传输（慢速移动时为 384Kbps，室内走动时为 2Mbps)，异步 BS，支持可变速传输，帧长 10ms，码片速率 3.84Mbps。

【主要技术特点】

☺ 基站同步方式，支持异步和同步的基站运行方式，组网方便、灵活。

☺ 调制方式，上行为 BPSK，下行为 QPSK，解调方式为导频辅助的相干解调。

☺ 接入方式为 DS-CDMA 方式。

☺ 采用三种编码方式，在语音信道采用卷积码（R=1/3，k=9）进行内部编码和 Veterbi 解码，在数据信道采用 Reed Solomon 编码，在控制信道采用卷积码（R=1/2，k=9）进行内部编码和 Veterbi 解码。

☺ 适应多种速率的传输，可灵活地提供多种业务，并根据不同的业务质量和业务速率分配不同的资源，同时对多速率、多媒体的业务可通过改变扩频比（对于低速率的 32Kbps、64Kbps、128Kbps 的业务）和多码并行传送（对于高于 128Kbps 的业务）的方式来实现。

☺ 上、下行快速及高效的功率控制大大减少了系统的多址干扰，提高了系统容量，同时也降低了传输的功率。

☺ 核心网络基于 GSM/GPRS 网络的演进，并保持与 GSM/GPRS 网络的兼容性；BTS（Base Transceiver Station，基站收发台）之间无须同步，因为 BS（Base Station，基站）可收发异步的 PN 码，即 BS 可跟踪对方发出的 PN 码，同时 MS 也可用额外的 PN 码进行捕获与跟踪，因此可获得同步，来支持越区切换及宏分集，而在 BTS 之间无须同步。

☺ 支持软切换和硬切换，切换方式包括三种，即扇区间软切换、小区间软切换和载频间硬切换。

W-CDMA 的发起者主要是欧洲和日本标准化组织与厂商，W-CDMA 继承了第二代移动通信体制 GSM 标准化程度高和开放性好的特点，标准化进展顺利，网络运营商可以通过在 GSM 网络上引入 GPRS 网络设备和新业务，培育数据业务消费群体，逐步过渡到 3G。

2．CDMA2000

CDMA2000 是从 CDMA One 演进而来的第三代移动通信技术。事实上，CDMA2000 标准是一个体系结构，称为 CDMA2000 family，它同样还包含一系列的子标准，由 CDMA One 向 3G 演进的途径为 CDMA One、CDMA2000 1x、CDMA2000 3x 和 CDMA2000 1xEV。其中从 CDMA2000 1x 之后均属于第三代技术。

【主要技术特点】

☺ 前反向同时采用导频辅助相干解调。

☺ 扩频码选择采用相同 M 序列，通过不同的相位偏置区分不同的小区和用户。

☺ 射频带宽从 1.25～20MHz 可调。

☺ 快速前向和反向功率控制。

☺ 下行信道中采用公共连续导频方式进行相干检测，提高系统容量。

☺ 在下行信道传输中，定义直扩和多载波传输两种方式，码片速率分别为 3.6864Mchip/s 和 1.22Mchip/s，多载波方式能很好地兼容 IS-95 网络。

☺ 支持 F-QPCH，可延长手机待机时间。

☺ 核心网络基于 ANSI-41 网络的演进，并保持与 ANSI-41 网络的兼容性。

☺ 支持软切换和硬切换。

☺ 设计了两类码复用业务信道，基本信道用于传送语音、信令和低速数据，是一个可变速率信道，补充信道用于传送高速率数据，在分组数据传送上应用了 ALOHA 技术，改善传输性能。

☺ 在同步方式上 CDMA2000 与 IS-95 相同，基站间同步采用 GPS 方式。

CDMA2000 的发起者主要是美国和韩国为主的以 IS-95 CDMA 为标准的制造和运营公司，CDMA2000 继承了 IS-95 窄带 CDMA 系统的技术特点，网络运营商同样可以通过在窄带 CDMA 网络中更换或增加部分网络设备过渡到 3G。

3．TD-SCDMA

TD-SCDMA 是采用时分双工模式（TDD）的第三代移动通信系统。

【主要技术特点】

☺ 信号带宽为 1.6MHz;

☺ 码片速率为 1.28Mchip/s;

☺ 采用智能天线技术，提高了频谱效率:

☺ 采用同步 CDMA 技术，降低上行用户间的干扰和保持时隙宽度;

☺ 接收机和发射机采用软件无线电技术;

☺ 采用联合检测技术，降低多址干扰;

☺ 多时隙，具有上、下行不对称信道分配能力，适应数据业务;

☺ 采用接力切换，降低掉话率，提高切换的效率;

☺ 语音编码 AMR 与 GSM 兼容;

☺ 核心网络基于 GSM/GPRS 网络的演进，并保持与它们的兼容性;

☺ 基站间采用 GPS 或者网络同步方式，降低基站间的干扰。

TD-SCDMA 是目前世界上唯一采用智能天线的第三代移动通信系统。因其采用 TDD 模式，上、下行链路采用同一频率，在同一时刻上、下行链路的空间物理特性是完全相同的，故可以充分发挥智能天线的作用。

TD-SCDMA 系统比较适合用于人口密度高，频率资源紧张，移动速度要求不是很高，但需要大量小半径、高容量的小区覆盖的地区。同时在这些地区对数据业务，特别是 Internet 等非对称数据业务的需求比较大时，TD-SCDMA 更能够充分发挥其技术优势。

18.2 W-CDMA/3GPP 通信系统仿真概述

本章针对 W-CDMA 标准，利用 ADS 的 W-CDMA/3GPP 工具箱对 3G 系统进行仿真，仿真包括以下五部分内容。

☺ 直接序列展频（Direct Sequence Spread Spectrum）;

☺ 基站信号源（Base Station Signals Source）;

☺ 用户设备信号源（User Equipment Signals Source）;

☺ 用户设备发射机（User Equipment Transmitter）;

☺ 用户设备接收机（User Equipment Receiver）。

由于基站发射机、基站接收机的仿真与用户设备发射机、用户设备接收机很相似，只

需把信号源换成基站信号源即可。这部分内容请读者自行查阅相关资料。以上五部分仿真很具有代表性，为 3G 通信系统的学习和研发提供良好的技术支持。

18.3　直接序列展频技术仿真

扩展频谱技术是一种常用的无线通信技术，简称展频技术。展频技术的无线局域网络产品是依据 FCC 规定的 ISM，频率范围开放在 902～928MHz 及 2.4～2.484GHz 两个频段，所以并没有所谓使用授权的限制。

展频技术主要分为跳频技术和直接序列展频两种方式。

【跳频技术（FHSS）】跳频技术是指收发双方传输信号的载波频率按照预定规律进行离散变化的通信方式，也就是说，通信中使用的载波频率受伪随机序列的控制而随机跳变。从时域上来看，跳频信号是一个多频率的频移键控信号；从频域上来看，跳频信号的频谱是在很宽频带上以不等间隔随机跳变的。

【直接序列展频（DSSS）】直接序列展频技术是用高速率的伪噪声码序列与信息码序列模二和（波形相乘）后的复合码序列，去控制载波的相位而获得直接序列扩频信号，即将原来较高功率、较窄的频率变成具有较宽频的低功率频率。

无线局域网络在性能和能力上的差异，主要取决于所采用的是 FHSS 还是 DSSS 来实现。截至目前，若以现有的产品参数详加比较，可以看出 DSSS 技术在需要最佳可靠性的应用中具有优势，而 FHSS 技术在需要低成本的应用中较占优势。

一般而言，DSSS 由于采用全频带传送资料，速度较快，未来可开发出更高传输频率的潜力也较大。以目前企业需求来说，高速移动端点应用较少，而大多较注重传输速率及传输的稳定性，所以 DSSS 技术是未来无线网络产品发展的主流。

18.3.1　扰码技术仿真

1．码字加扰

（1）创建新工程，名称为 3Gpp_DDSS。单击，新建电路原理图文件，名称为 Scramblecode。

（2）在“Common Components”类中，选择、控件；在“Numeric Communications”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 18-1、图 18-2 所示。

（3）在“Common Components”类中，选择控件，放置到原理图中，双击修改属性，如图 18-3 所示。单击工具栏中的按钮，把各元件连接成如图 18-4 所示的电路。

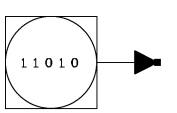


图 18-1　输入源

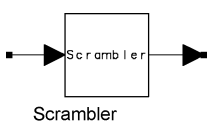


图 18-2　元件属性修改

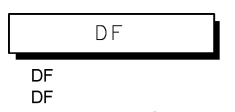


图 18-3　仿真属性修改

（4）单击工具栏中的按钮进行仿真。仿真结束后，单击工具栏中的按钮，出现数

据显示窗口。单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“In”参数，窗口中显示出“In”参数曲线。双击曲线修改曲线属性选择“Digital”形式，如图 18-5 所示，用同样的方法加入“Scrambled”参数曲线，得到如图 18-6 所示的仿真波形。

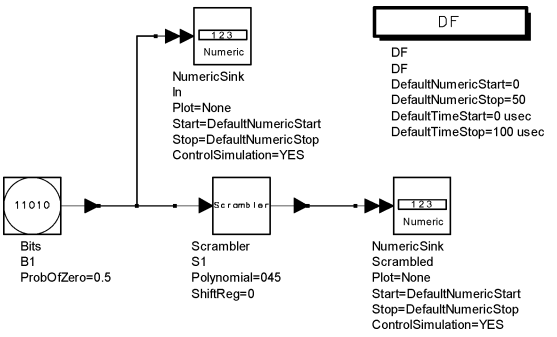


图 18-4　加扰电路原理图

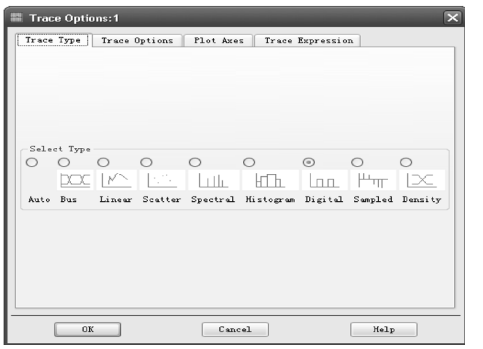


图 18-5　曲线输出设置

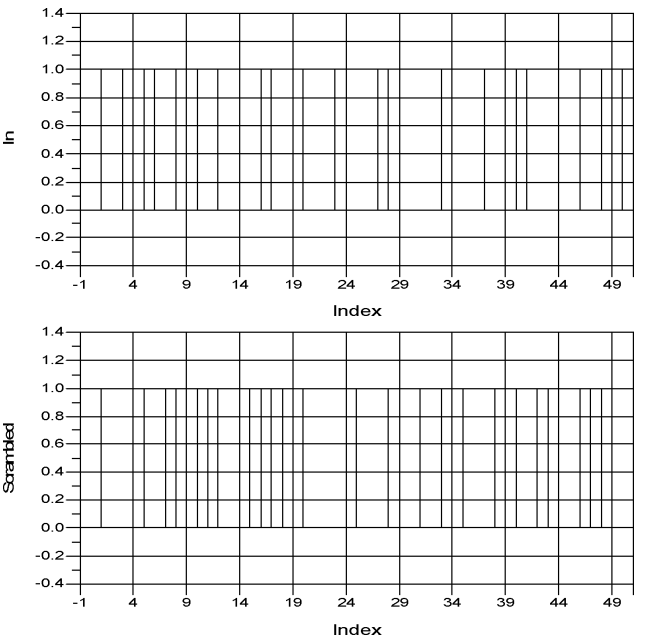


图 18-6　仿真数据输出

2．码字解扰

（1）新建原理图窗口，名称为 DeScramblecode。

（2）在“Common Components”类中，选择、控件；在“Numeric Communications”类中，选择、控件；在“Common Components”类中，选择控件，双击修改属性，如图 18-7 所示。

（3）单击工具栏中的按钮，把各元件连接成如图 18-8 所示的电路图。单击工具栏中的按钮进行仿真。单击工具栏中的按钮，出现数据显示窗口。单击数据显示窗口左侧

工具栏中的按钮，弹出设置窗口，选择显示“In”参数曲线，用同样的方法加入“Scrambled”和“DeScrambled”参数曲线，如图 18-9 所示。

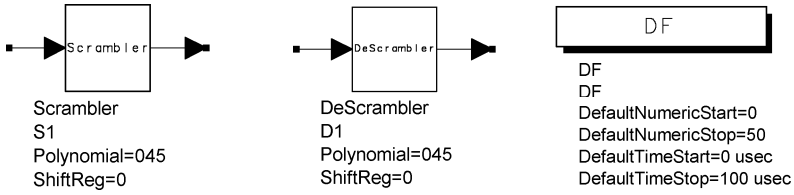


图 18-7　属性设置

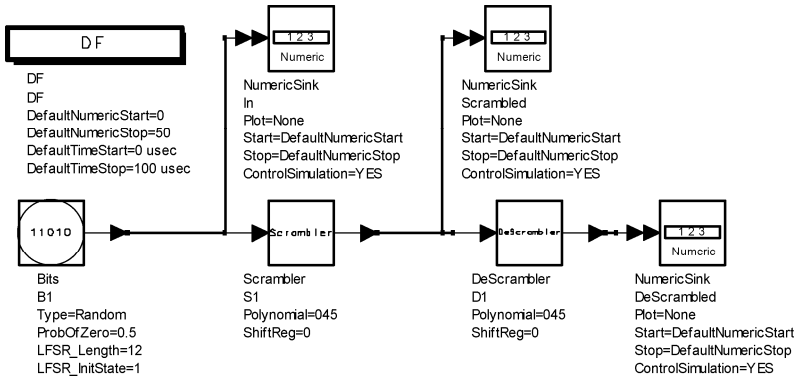


图 18-8　解扰码电路原理图

（4）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，添加如图 18-10 所示的等式。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，选择“scrambling_effect”和“descrambling_effcet”参数添加到列表中，得到如图 18-11 所示的仿真数据。

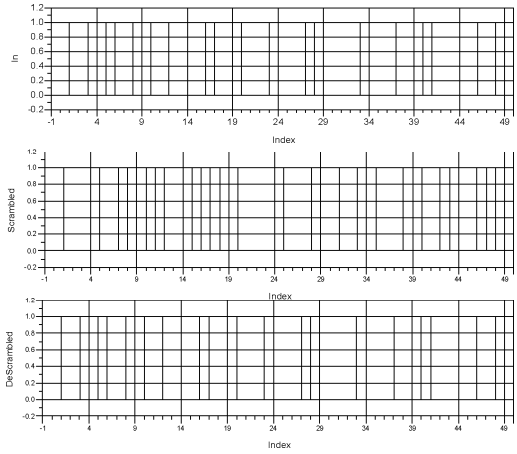


图 18-9　仿真曲线

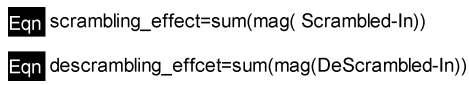
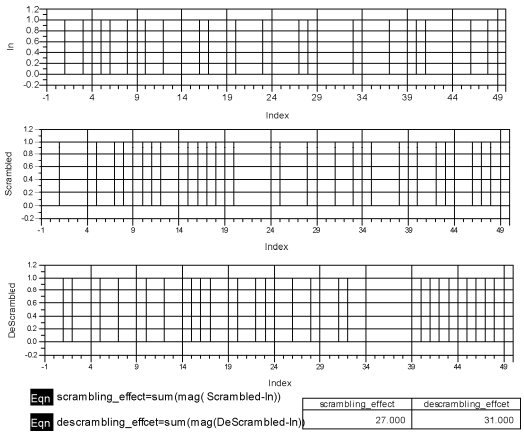


图 18-10　等式设置

图 18-10 所示的等式是计算扰码与源码之间不同码的个数，图 18-11 表明加扰后不同码数为 27 个和解扰后不同码数为零，起到了解码作用。

（6）双击原理图中的“DeScrambled”元件修改属性 Polynomial=043，重新进行仿真，得到如图 18-12 所示的图形。



scrambling_effect	descrambling_effcet
27.000	0.000

图 18-11　仿真数据

图 18-12　修改后仿真结果

> “Scrambled”和“Descrambled”元件“Polynomial”参数设置不同，没有产生解扰作用。

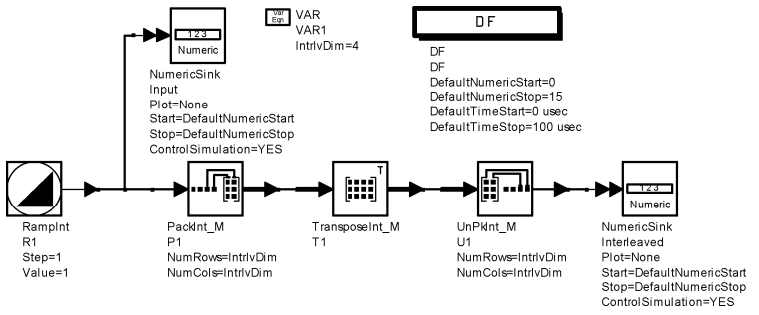
18.3.2　交织码技术仿真

1．码字交织

（1）新建电路原理窗口，名称为 InterLeavingcode。

（2）在“Numeric Sources”类中，选择 控件，在“Numeric Matrix”类中，分别选择 控件，在“Common Components”类中，选择两个 控件，双击分别修改命名为“Input”和“Interleaved”。选择 控件及 按钮，进行变量及仿真设置。单击工具栏中的 按钮，将元件按照图 18-13 所示进行连接并设置属性。

（3）单击工具栏中的 按钮，进行仿真。仿真结束后，得到如图 18-14 所示的数据。



Index	Input	Interleaved
0	1.000	1.000
1	2.000	5.000
2	3.000	9.000
3	4.000	13.000
4	5.000	2.000
5	6.000	6.000
6	7.000	10.000
7	8.000	14.000
8	9.000	3.000
9	10.000	7.000
10	11.000	11.000
11	12.000	15.000
12	13.000	4.000
13	14.000	8.000
14	15.000	12.000
15	16.000	16.000

图 18-13　交织码原理图

图 18-14　仿真数据

> 从仿真数据可以看出，进行交织后码的位置有所改变。

2．码字解交织

（1）新建电路原理窗口，名称为 DeInterLeavingcode。按照图 18-15 所示，建立原理图。

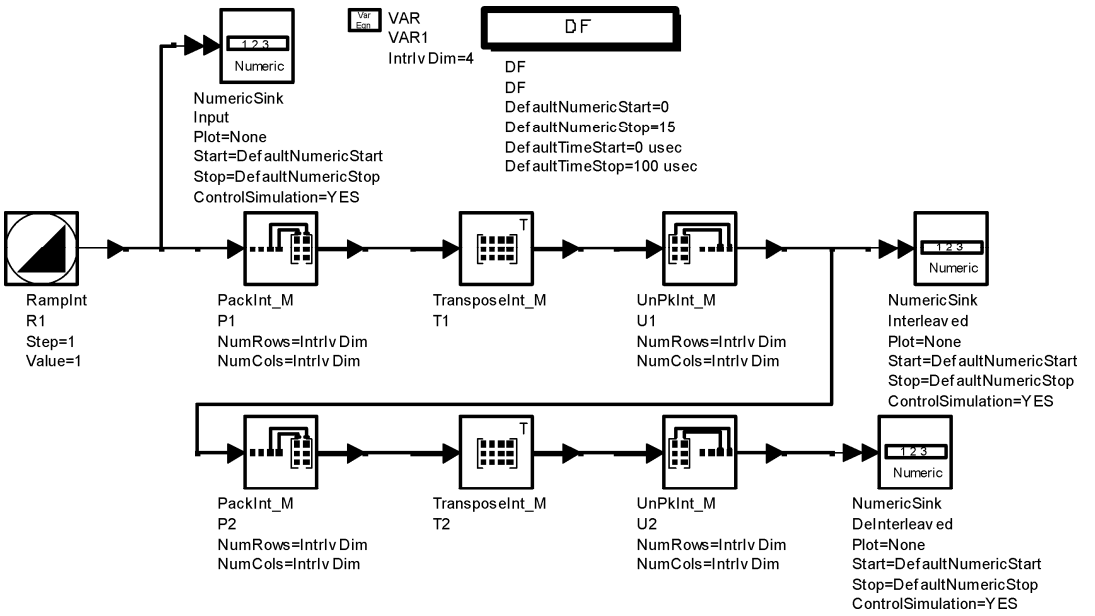


图 18-15　解交织电路原理图

（2）单击工具栏中的按钮，进行仿真。仿真结束后，得到如图 18-16 所示的仿真结果。从仿真结果中可以看出解交织的作用。

Index	Input	Interleaved	DeInterleaved
0	1.000	1.000	1.000
1	2.000	5.000	2.000
2	3.000	9.000	3.000
3	4.000	13.000	4.000
4	5.000	2.000	5.000
5	6.000	6.000	6.000
6	7.000	10.000	7.000
7	8.000	14.000	8.000
8	9.000	3.000	9.000
9	10.000	7.000	10.000
10	11.000	11.000	11.000
11	12.000	15.000	12.000
12	13.000	4.000	13.000
13	14.000	8.000	14.000
14	15.000	12.000	15.000
15	16.000	16.000	16.000

Eqn difference=sum(mag(DeInterleaved-Input))

difference
0.000

图 18-16　解交织仿真结果

（3）按照图 18-17 所示修改电路图，然后重新进行仿真，得到如图 18-18 所示的仿真数据。从仿真数据可以看出，得到了实际应用的数据流交织。

18.3.3　扩频技术仿真

1．码字扩频

（1）新建电路原理窗口，名称为 Spreadingcode。按照图 18-19 所示建立原理图，并设置参数。

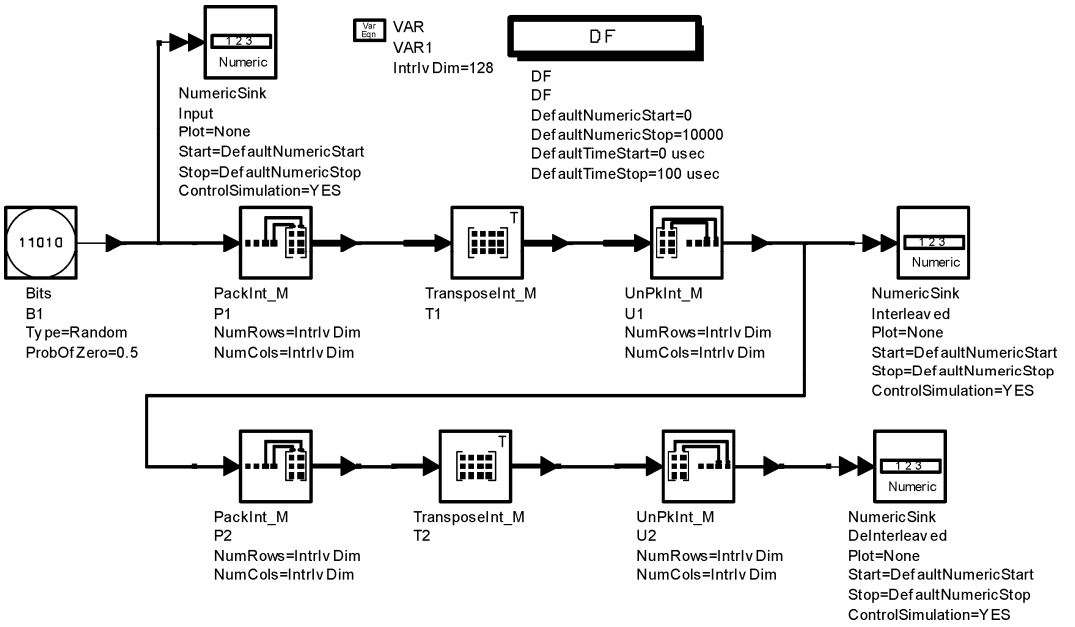


图 18-17　修改后电路图

Index	Input	Interleaved	DeInterleaved
0	0.000	0.000	0.000
1	1.000	1.000	1.000
2	1.000	1.000	1.000
3	0.000	1.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000
5	1.000	1.000	1.000
6	0.000	1.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000
8	1.000	1.000	1.000
9	1.000	0.000	1.000
10	0.000	1.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000
12	1.000	0.000	1.000
13	1.000	0.000	1.000
14	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000
16	1.000	1.000	1.000
17	0.000	1.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000
19	1.000	0.000	1.000

Eqn difference=sum(mag(DeInterleaved-Input))

difference
0.000

图 18-18　数据流交织

> 元件查找可以利用 ADS 中的查找功能，为了方便起见，添加元件过程从略。

（2）单击工具栏中的按钮，进行仿真，得到如图 18-20 所示的仿真结果。

> 图形显示时，要注意选择“Sampled”形式，仿真图形反映了扩频的作用。

（3）把上面的电路进行封装，删除“WaveForm”、“NumericSink”元件及“VAR”和“DF”元件，双击元件“Repeat”和“Scrambler”修改其属性。单击工具栏中的按钮，添加两个端口到原理图中，得到如图 18-21 所示的封装元件原理图。并另存文件名为“x_d2_spreader”。

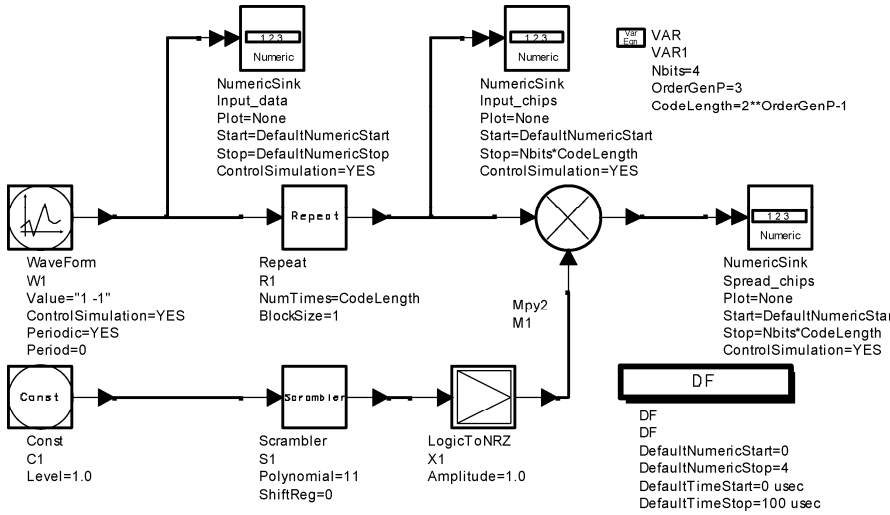


图 18-19　扩频码电路原理图

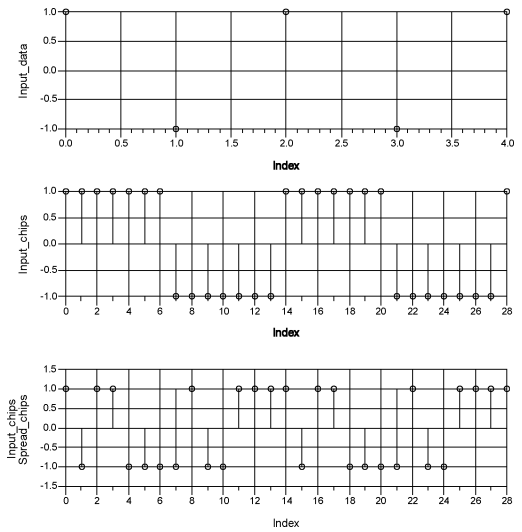


图 18-20　扩频后仿真图形

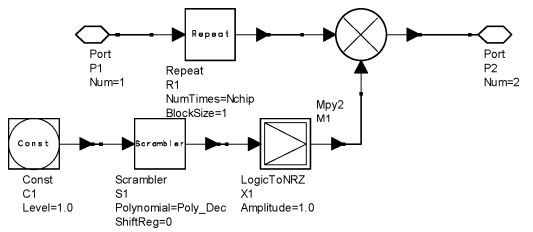


图 18-21　封装元件原理图

2．扩频码功率谱分析

（1）新建电路原理窗口。利用刚才封装的元件创建如图 18-22 所示的电路原理图。

（2）单击工具栏中的按钮，进行仿真。仿真结束后，单击工具栏中的按钮，出现数据显示窗口。单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“Spread”参数和“UnSpread”参数，得到如图 18-23 所示的图形。

从图 18-23 中可以看出，扩频后（Spread）信号的带宽比没有扩频（UnSpread）信号的带宽大得多。

（3）回到原理图编辑窗口，利用“USampleRF”元件对原理图进行修改，如图 18-24 所示。修改后另存文件，名称为“UpSample”。

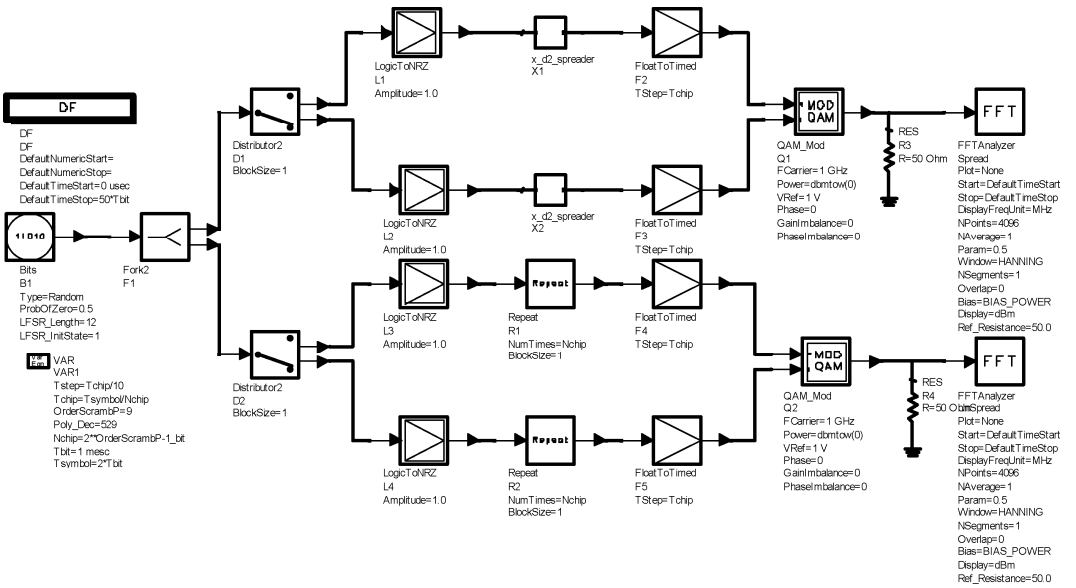


图 18-22　扩频码功率谱原理图

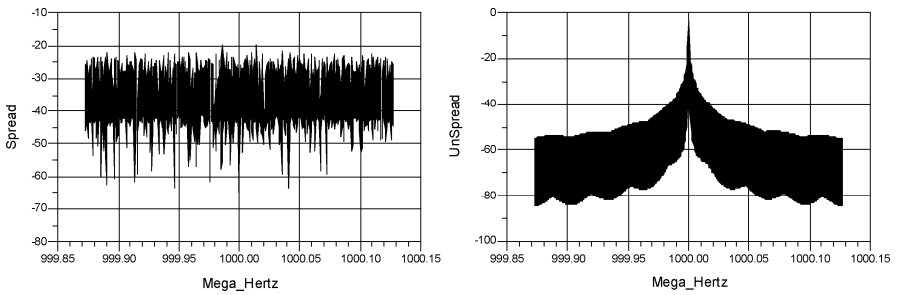


图 18-23　扩频码功率谱图

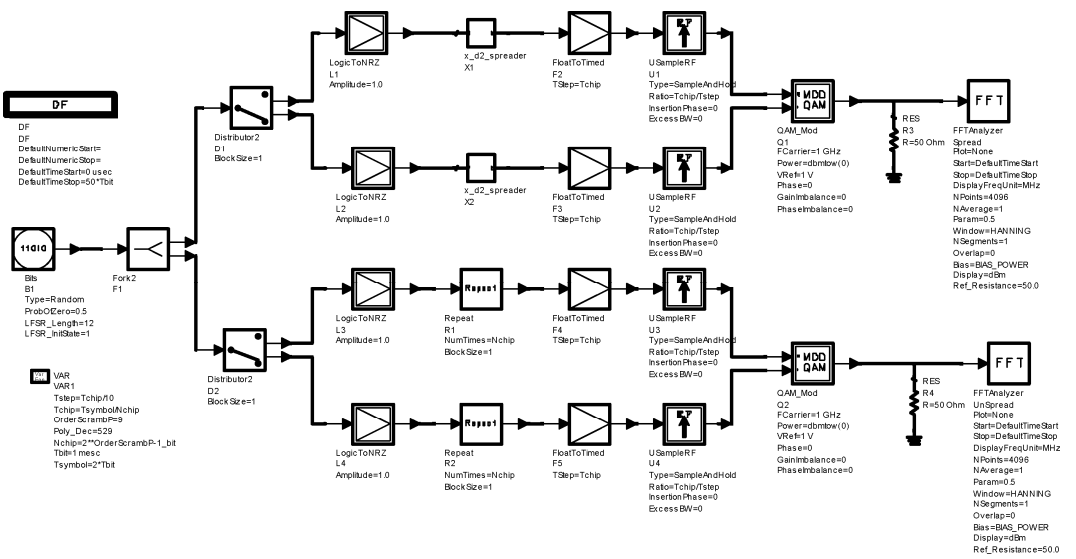


图 18-24　修改后原理图

（4）单击工具栏中的按钮进行仿真。仿真结束后，单击工具栏中的控件，出现数据显示窗口。

> “USampleRF”元件的作用是时域“升采样”，其作用是提高功率谱的范围。

（5）单击数据显示窗口左侧工具栏中的按钮，弹出设置窗口，在窗口左侧的列表里选择“Spread”参数和“UnSpread”参数，得到如图 18-25 所示图形。

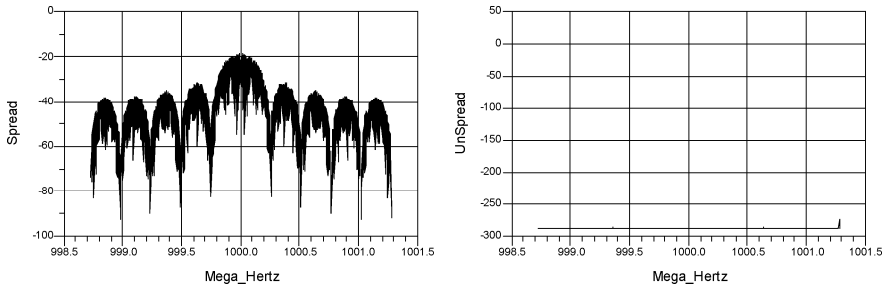


图 18-25　修改后的仿真结果图

（6）返回原理图编辑窗口，另存原理图文件，名称为 LPFUpSample。利用“LPF_RaisedCosineTimed”元件修改电路原理图，如图 18-26 所示。

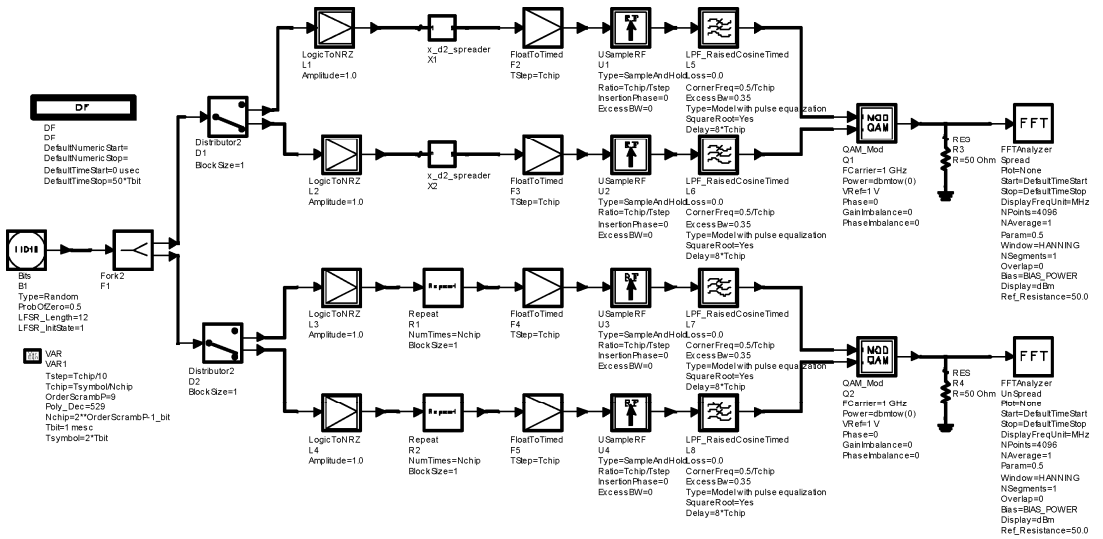


图 18-26　修改后原理图

> 由于采样信号为矩形信号，所以功率谱有很多旁瓣。

（7）重新进行仿真。单击数据显示窗口，在窗口左侧的列表里选择“Spread”参数，在“Datasets and Equations”处选择“UpSample”文件的“Spread”参数，得到如图 18-27 所示波形。

3．码字解扩

（1）新建一个电路原理窗口，名称为“x_f1_despreader”。按照图 18-28 所示连接各元

件并保存。

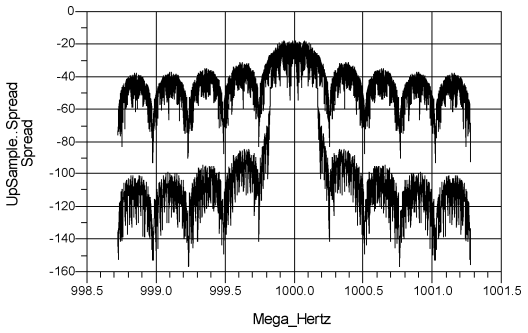


图 18-27　仿真结果对比

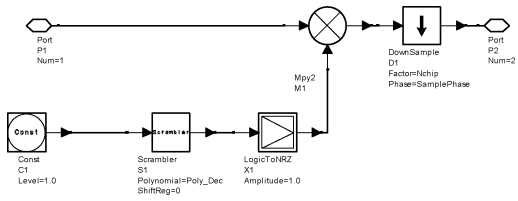


图 18-28　新建模块电路原理图

（2）重新建立一个原理图文件，名称为“DeSpreading”。利用新建模块，建立如图 18-29 所示电路图。

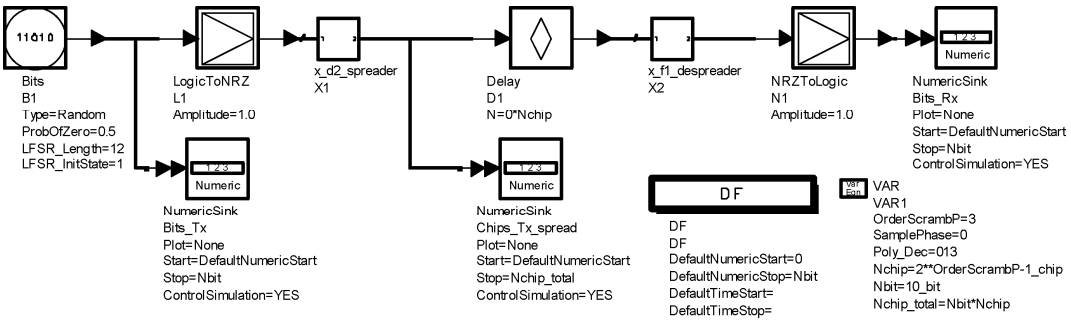


图 18-29　解扩原理图

（3）单击工具栏中的按钮，进行仿真。单击工具栏中的按钮，出现数据显示窗口。弹出设置窗口， 显示“Bits_Tx”参数、“Bits_Rx”参数曲线，如图 18-30 所示。

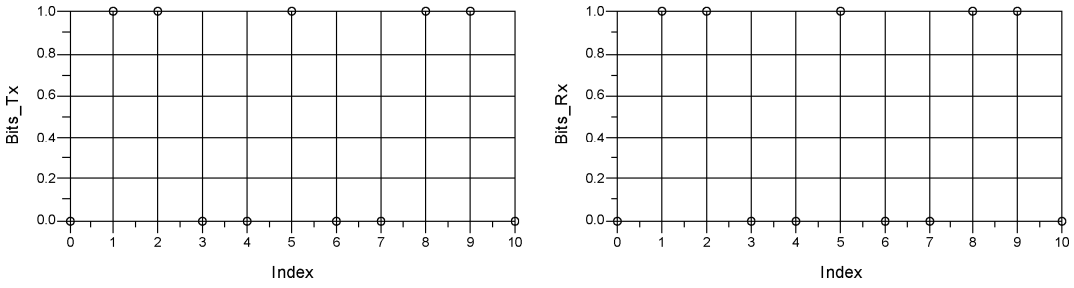


图 18-30　解扩仿真图形

从图 18-30 中可以看出，接收端的序列与发送端相同。

（4）双击“Delay”元件修改其属性 N=0.5*Nchip，单击工具栏中的按钮，重新进行仿真，结果如图 18-31 所示。

从图 18-31 中可以看出，接收端的序列与发送端不同，没有达到正确解扩。

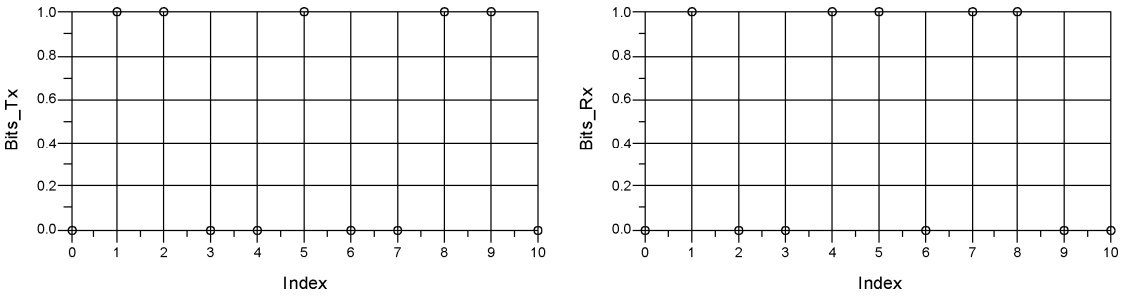


图 18-31　修改后仿真结果 1

（5）双击“Delay”元件修改其属性 N=2*Nchip，单击工具栏中的按钮，重新进行仿真，结果如图 18-32 所示。

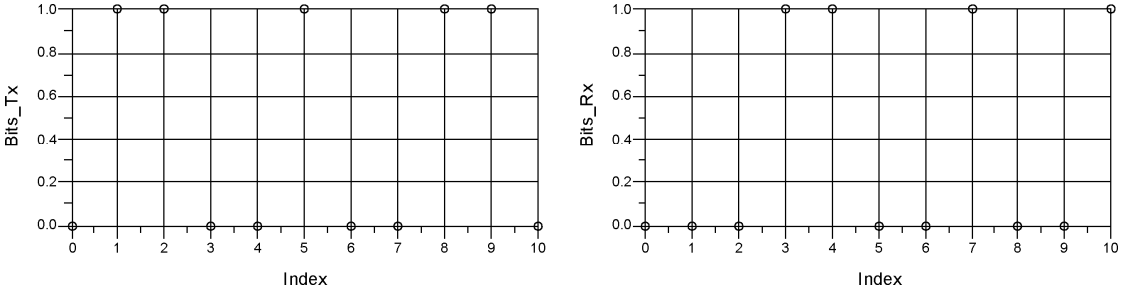


图 18-32　修改后仿真结果 2

从图 18-32 中可以看出，接收端的序列与发送端相同。 有 1Bit 时间延时。所以 N 为 Nchip 整数倍时都可以完成解扩。

18.4　基站信号仿真

观察下行信号（基站到用户设备之间的通信）的统计特性，并且分析该信号通过非线性放大器后的影响。

18.4.1　逻辑信道仿真

1．专用物理信道（Dedicated Physical Channel，DPCH）

（1）新建工程，名称为“3gpp_bs_sigsrc”。新建原理图文件，名称为“a_bs_src_eval”。

（2）在“3GPPFDD 10-99 Base Station”类中，选择控件，该控件是用来测量下行信道的信号源。在“Signal Converters”类中，选择控件，信号实部和虚部的合成，完成信号的转换。在“Common Components”类中，选择控件，该控件完成数据的输出。在“Interactive Controls and Displays”类中，选择控件，绘制随输入变化的曲线。按照图 18-33 所示，连接各元件。

（3）进行变量和仿真设置，如图 18-34 所示。

（4）仿真，结果输出，如图 18-35 所示。

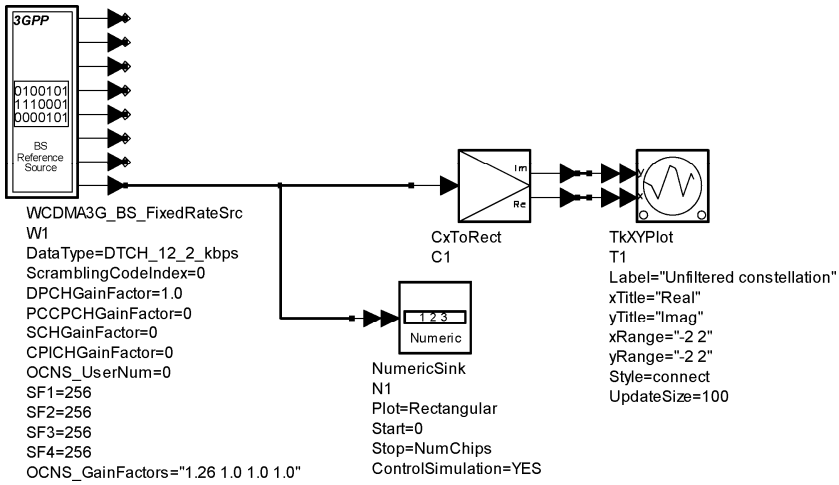


图 18-33　DPCH 原理图

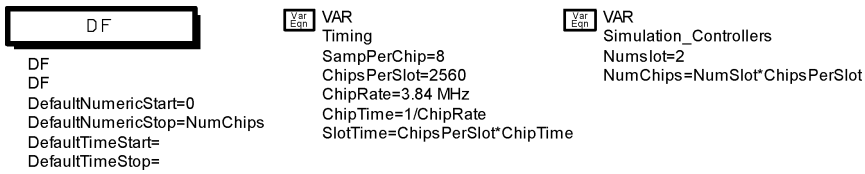


图 18-34　变量和仿真设置

> 仿真是动态进行的，图 18-36 所示是截取 Chip 的一个样本得到的。可以修改“TkXYPlot”控件中的“Style=dot”，仿真曲线可以更加明确，轨迹是个 QPSK 信号。

（5）单击按钮，新建数据显示窗口，显示“N1”参数，如图 18-36 所示。为了便于观察，此处 X 轴的范围是（0，2 000）。

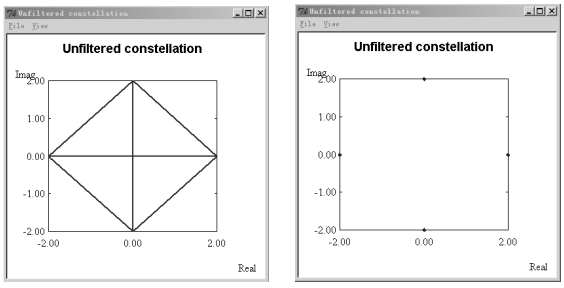


图 18-35　DPCH 仿真轨迹图

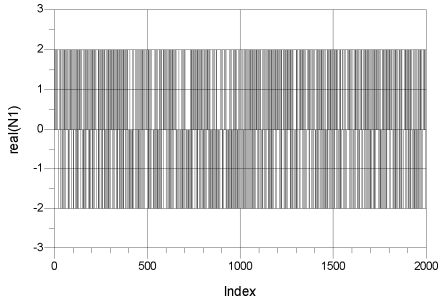


图 18-36　DPCH 仿真数据图

2．同步信道（Synchronization Channel，SCH）

（1）将图 18-33 中“SCHGainFactor=0”改为“SCHGainFactor=dbpolar(5,0)”，如图 18-37 所示。

（2）将“TkXYPlot”的 xRange、yRange 修改成（-8～+8），如图 18-38 所示。

（3）重新进行仿真，输出结果，如图 18-39 所示。

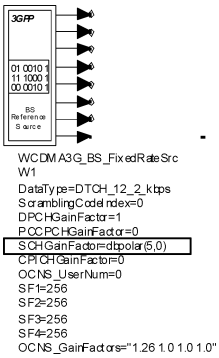


图 18-37　属性修改

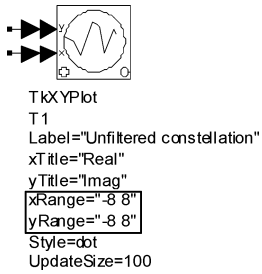


图 18-38　xRange、yRange 修改

> 信号幅度的包络宽展和缩减迅速。如果利用同步信号传送信息，在每个时隙中 10%为数据，剩下的 90%没有数据。不再是标准的 QPSK 信号。

（4）新建数据显示窗口，显示“N1”参数，如图 18-40 所示。

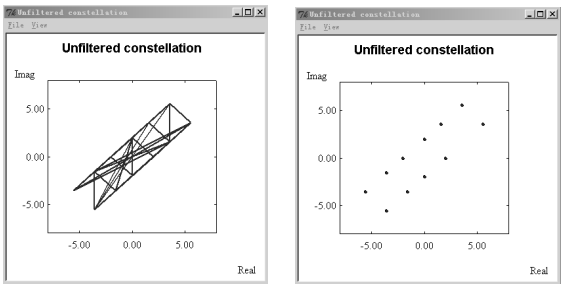


图 18-39　SCH 仿真星座图

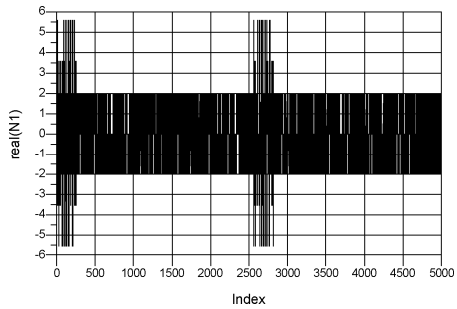
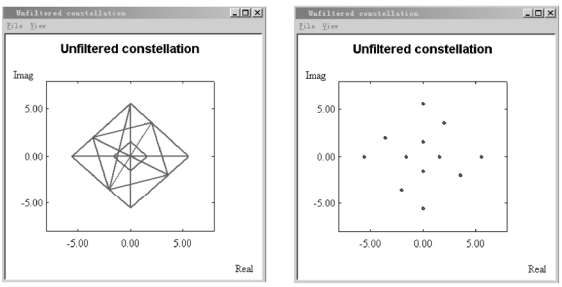


图 18-40　SCH 仿真数据图

3．公共引导信道（Common Pilot Channel，CPIH）

修改“WCDMA3G_BS_RixedRateSrc”属性，除了“DPCHGainFactor=1”外，“CPICH-GainFactor”为 5dB，其他都为零。重新仿真，轨迹与数据如图 18-41 所示。



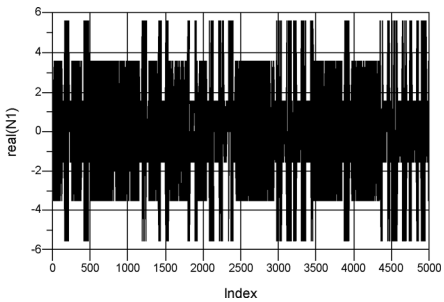


图 18-41　CPICH 仿真结果图

4．正交信道噪声（Orthogonal Channel Noise Simulator，OCNS）

（1）修改“WCDMA3G_BS_RixedRateSrc”属性，除了“DPCHGainFactor=1”外，所

有的都为零，同时“OCNS_userNum=1”。重新仿真，观察仿真结果，如图 18-42 所示。

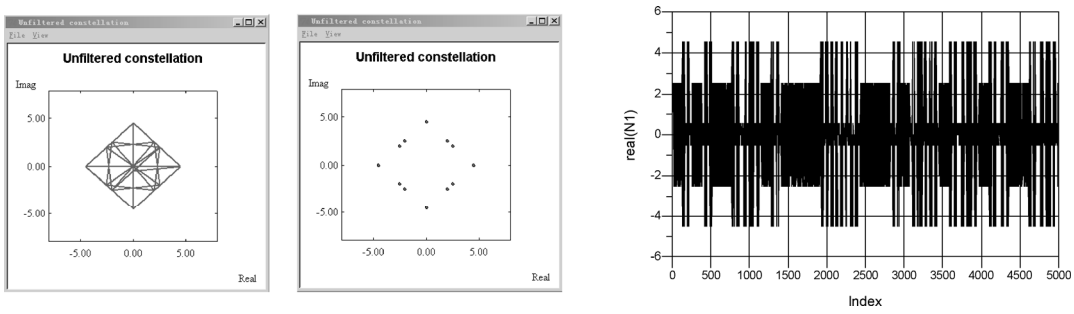


图 18-42　OCNS 用户数为 1 仿真结果图

（2）修改“OCNS_userNum=4”，重新仿真，观察仿真结果，如图 18-43 所示。

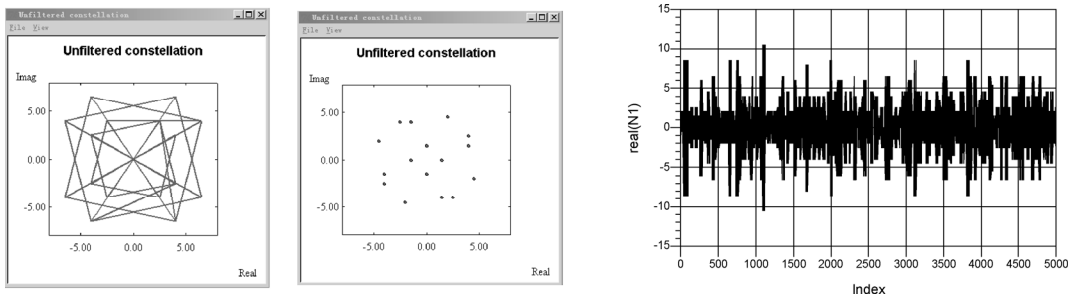
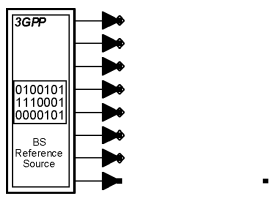


图 18-43　OCNS 用户数为 4 仿真结果图

📖 观察图 18-43 所示动态包络变化，这表明在同一个基站有多个用户。

5．混合信道（Combined Channel，CC）

（1）修改属性，如图 18-44 所示。



WCDMA3G_BS_FixedRateSrc
W1
DataType=DTCH_12_2_kbps
ScramblingCodeIndex=0
DPCHGainFactor=1
PCCPCHGainFactor=dbpolar(5,0)
SCHGainFactor=dbpolar(5,0)
CPICHGainFactor=dbpolar(7,0)
OCNS_UserNum=1
SF1=256
SF2=256
SF3=256
SF4=256
OCNS_GainFactors="1.26 1.0 1.0 1.0"

图 18-44　修改属性

（2）重新仿真，观察仿真结果，如图 18-45 所示。

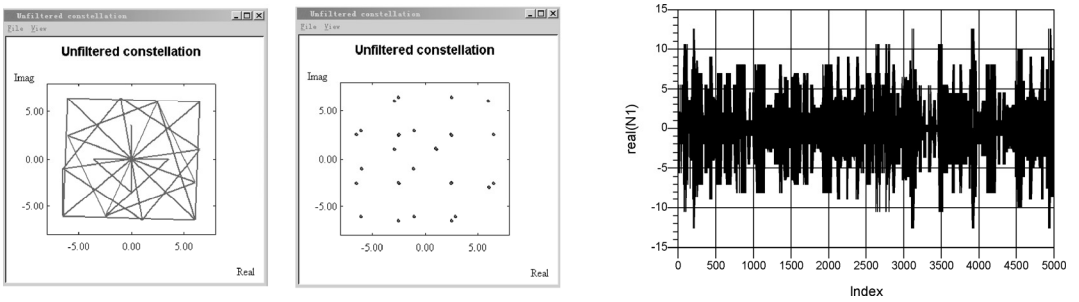


图 18-45　CC 仿真结果图

在同一时刻，基站和多于一个移动终端进行通信。它们通过附加信号在Ⅰ、Q通道。这些信号对于不同的终端来讲在编码方式上是相互正交的。3Gpp 信号是个非常复杂的信号。

18.4.2　射频功率测量

（1）新建原理图文件，名称为“a_b_src_powerm”。按照如图 18-46 所示，建立电路连接。

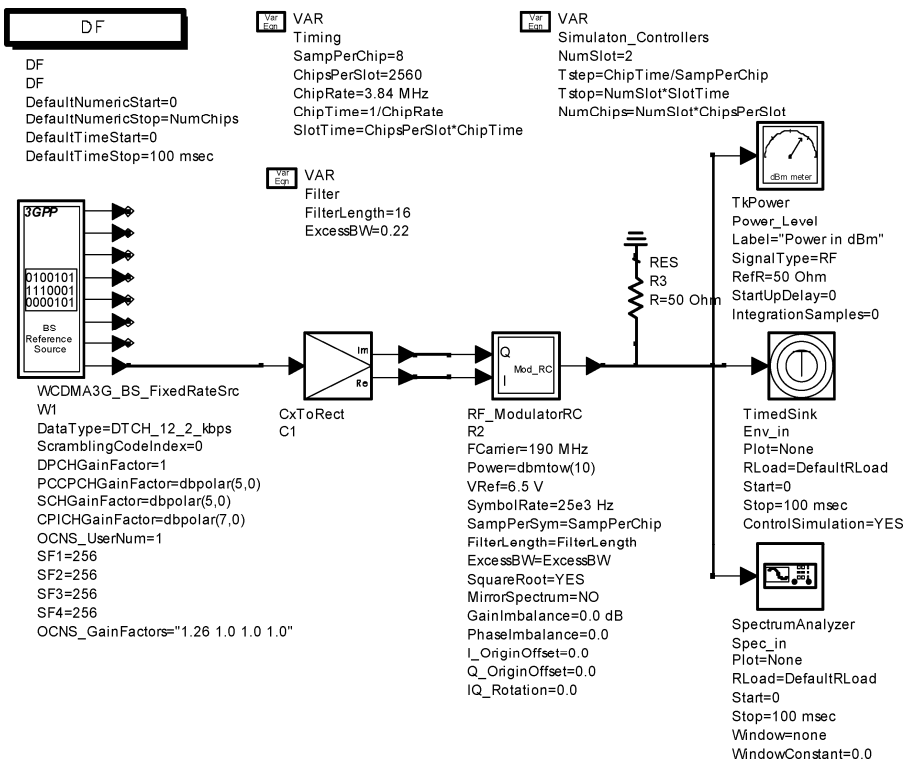


图 18-46　功率测试原理图

“RF_ModulatorRC”元件中“VRef”很重要，若其设置不正确，计算出来的功率会不准确。

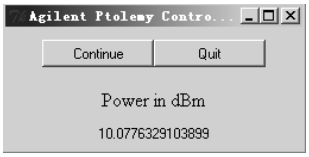


图 18-47　输出功率值

（2）仿真结果输出，如图 18-47 所示。

18.4.3　CCDF 测量

互补式累积分布函数（Complementary Cumulative Distribution Function，CCDF）对 3G 系统非常重要。CCDF 曲线表明无线信号在特定功率水平上占用的时间百分比。CCDF 的曲线分析有助于研发工程师观察不同调制格式的影响，并确保系统器件能经受住高峰值功率测试信号。

（1）将图 18-46 中的“TkPower”元件关闭，重新仿真。数据显示窗口和仿真图形如图 18-48 所示。

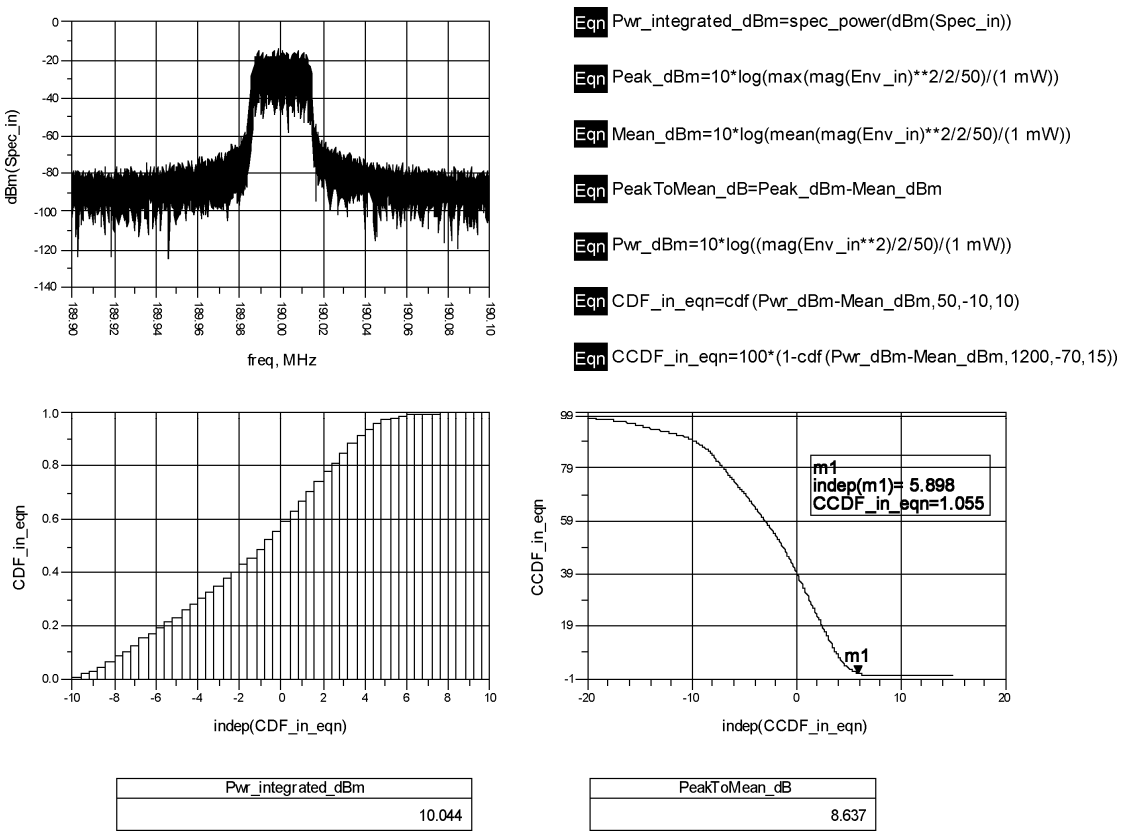


图 18-48　CCDF 测试结果

> 从图 18-48 中可以看出，“Integrated”功率为 10dBm，与元件“RF_ModulatorRC”设置的功率一致。CCDF 用百分之几 dB 描述，如图中 m1 表示峰值功率超过平均功率 5.898dB1%，峰均值为 8.637dB。

（2）修改源控件设置，“DPCF”为 1.0，其余为 0.0。保证平均功率为 10dBm，修改 VRef 值为 2V。重新仿真，得到仿真图形如图 18-49 所示。CCDF 为 3.631dB1%，峰均值为 5.288dB。

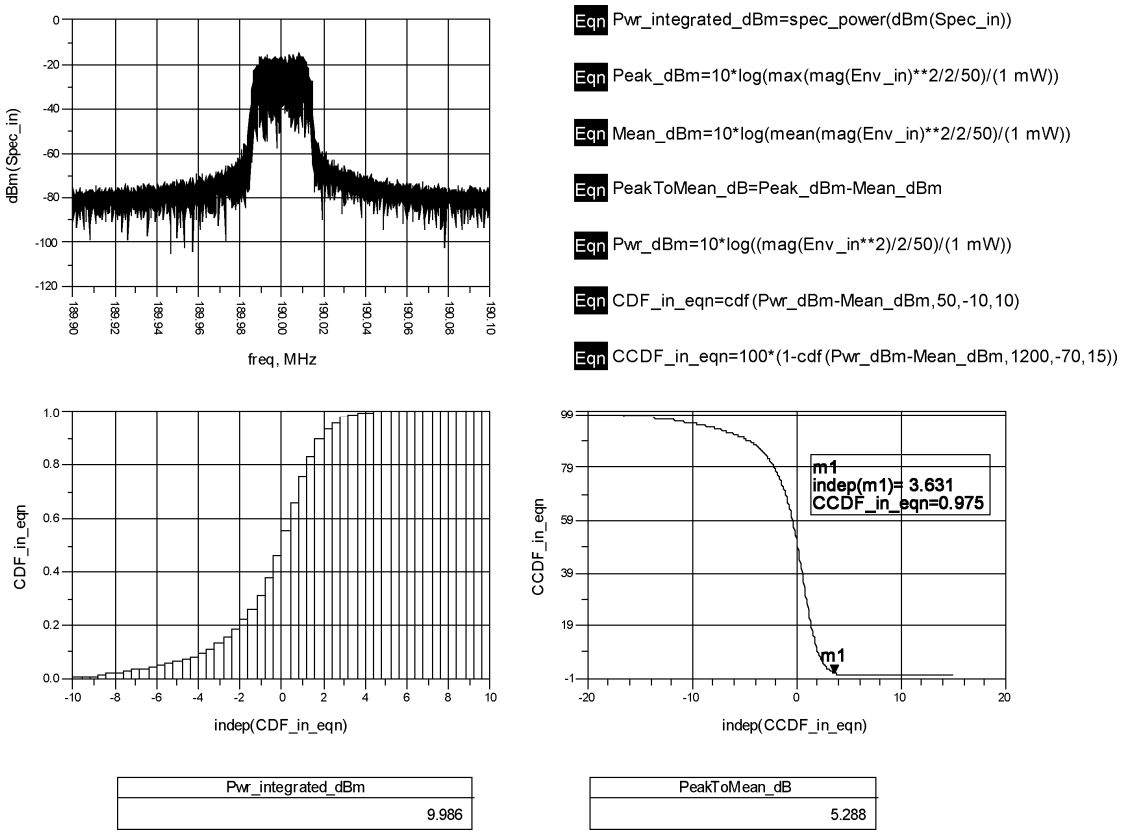


图 18-49　VRef 对 CCDF 的影响

18.4.4　利用 WCDMA3G_CCDF 测量

（1）重新建立一个原理图文件，名字为“b_CCDF”。将源参数改回到典型设置，如图 18-50 所示。

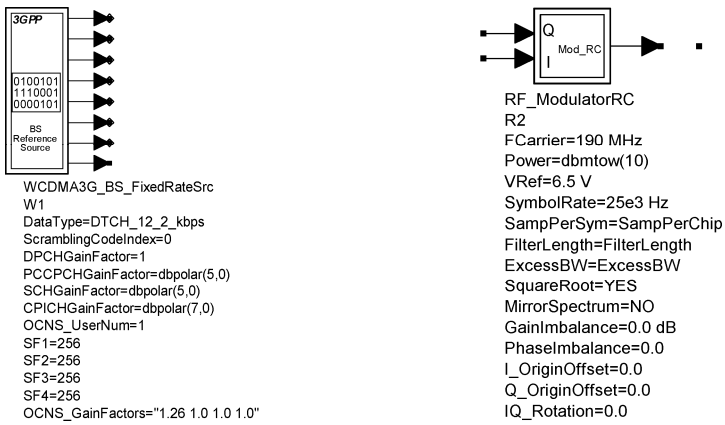


图 18-50　恢复参数设置

（2）在“3GPPFDD 10-99 Measurement”类中，选择 CCDF 控件，按照图 18-51 所示连接元件。

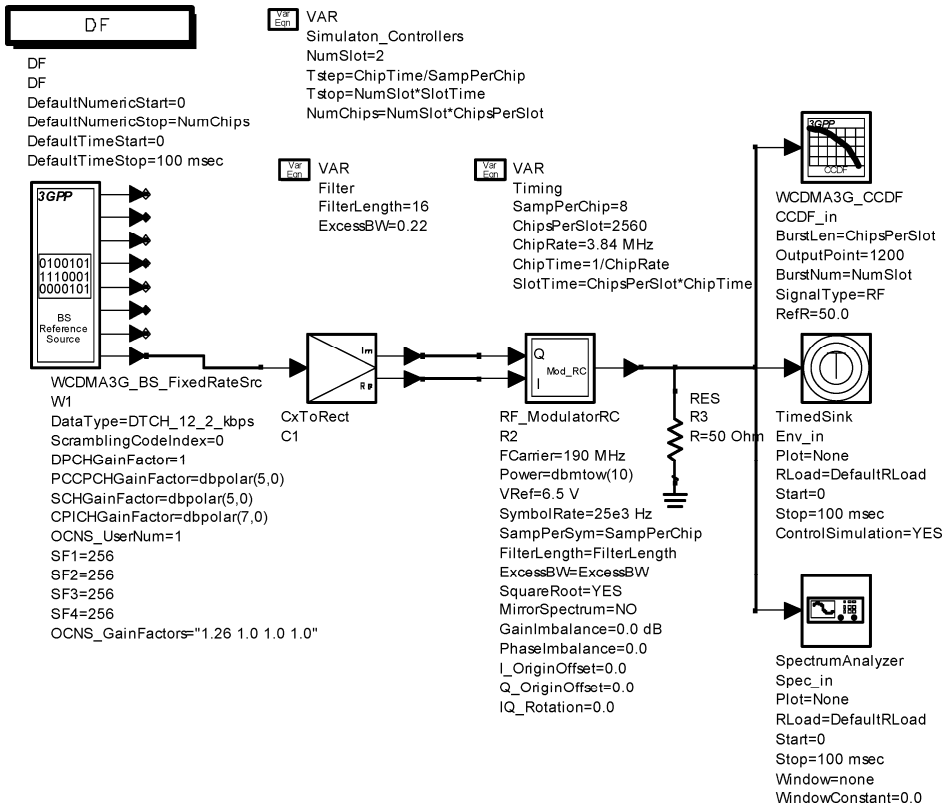


图 18-51　WCDMA3G_CCDF 元件使用原理图

（3）新建数据显示窗口，显示 CCDF 仿真结果，如图 18-52 所示。

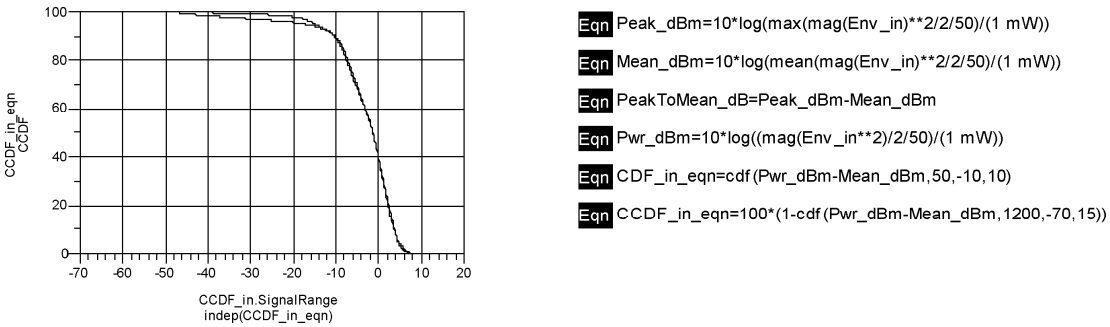


图 18-52　CCDF 仿真结果

从图 18-52 可以看出，计算出来的 CCDF 与 CCDF 控件输出的结果非常接近。

（4）显示输出频谱，并计算输出功率，如图 18-53 所示。

18.4.5　非线性电路对频谱和 CCDF 的影响

（1）将“b_CCDF”原理图另存为“b_CCDF_non_linear”。在“Timed Nonlinear”类中，选择 元件，设置属性。“GCType=none” 表示放大器为非线性器件。按照图 18-54 所示连接元件。

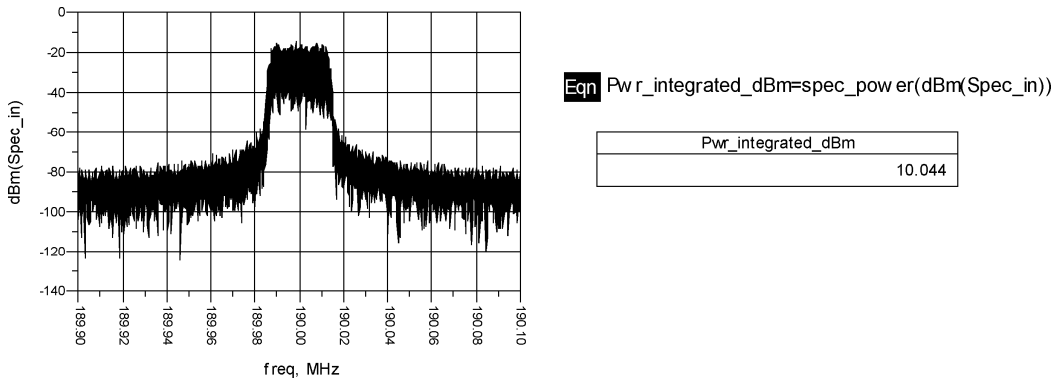


图 18-53　输出频谱和功率

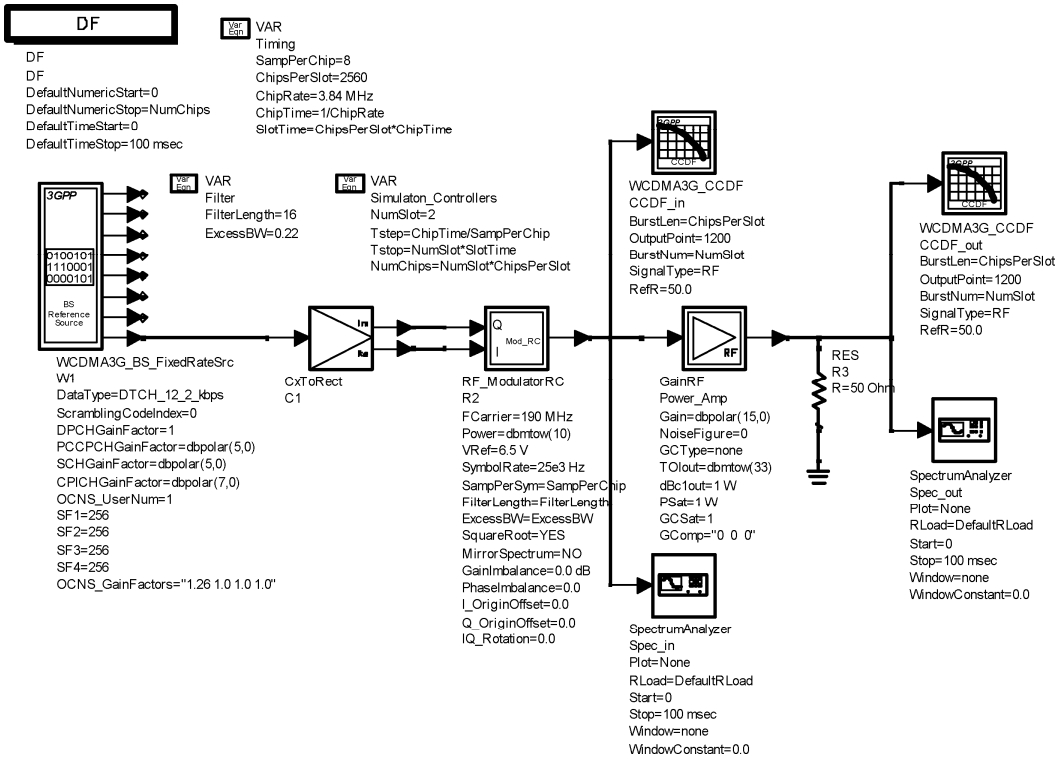


图 18-54　非线性电路对 CCDF 的影响

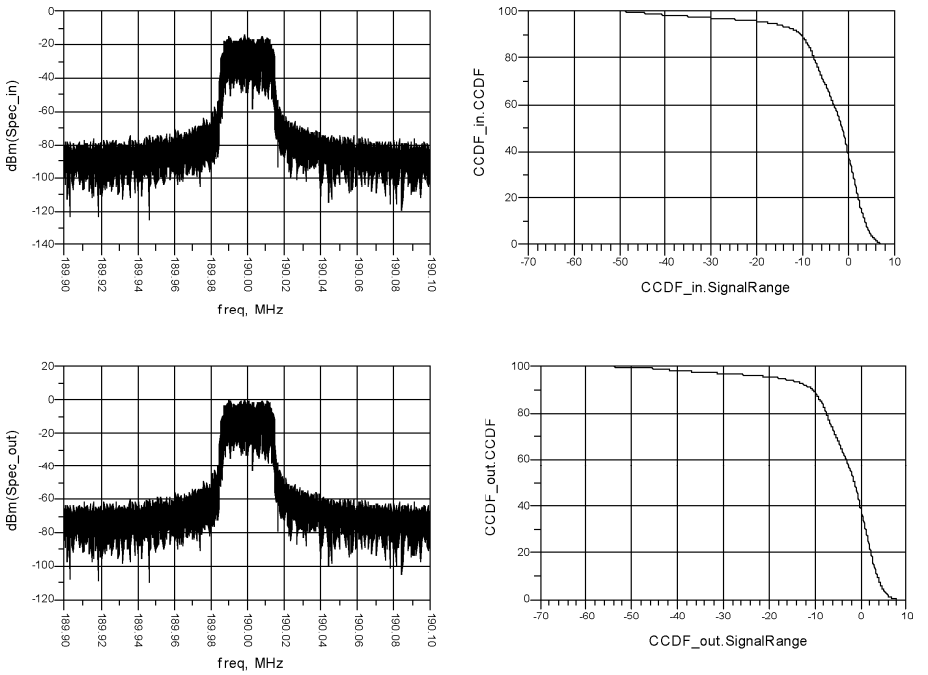
（2）仿真输出如图 18-55 所示。

经过非线性器件后，对 CCDF 没有任何的影响，平均功率输入、输出正好相差 15dB。

（3）修改“GCType=TOI”，仿真曲线如图 18-56 所示。

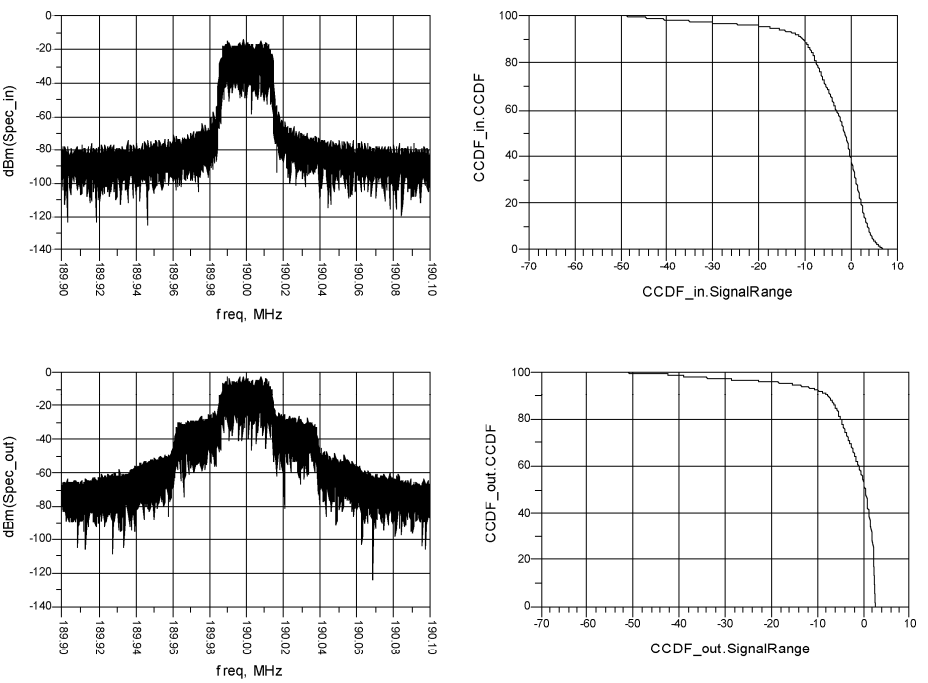
CCDF 没有任何变化，但是输出平均功率为 33.3dB，没有增加 15dB 而只有 12dB。

【The Primary Common Control Physical Channel（P-CCPCH）】该信道承载着称作广播信道（Broadcast Channel，BCH ）的传输信道，承载着系统的辅助信息。



Index	CCDF_in.MeanPower	CCDF_out.MeanPower
5119	10.153	25.153

图 18-55　非线性电路对 CCDF 值的影响



Index	CCDF_in.MeanPower	CCDF_out.MeanPower
5119	10.153	22.325

图 18-56　修改后仿真曲线

【**The Secondary Common Control Physical Channel（S-CCPCH）**】该信道承载前向访问信道（Forward Access Channel）或者包信道（Paging Channel）。为了辅助移动终端在网络中的同步，每个基站还传输同步信道（Synchronization Channel）。

专用逻辑信道承载着专用信道，专用信道是个传输信道。专用逻辑信道有两个子信道 DPDCH（Dedicated Physical Date Channel）和 DPCCH（Dedicated Physical Control Channel），ADS 提供 DPCH CPICH P-CCPCH 和 SCH，经过以上仿真，总结以下三点：

☺ 统计特性依赖于信道设置；

☺ 非线性电路改变信号的统计特性；

☺ 需要利用信号的实部来设计和测试信号。

18.5　用户设备信号仿真

使用“WCDMA3G_UE_FixedRateSrc”元件来加强 3GPP 上行信道概念；观察上行信号轨迹随着 DPDCH 和 DPCCH 设置改变而变化的情况；通过峰均功率比和 CCDF 曲线（而不是 HPSK Walsh 旋转率）来理解 HPSK 调制的优点。

18.5.1　逻辑信道仿真

1．专用物理数据信道（Dedicated Physical Data Channel，DPDCH）

（1）创建一个新项目名称为“3gpp_UE_sigsrc”。新建一个设计名称为“a_UE_src_eval”。

（2）在“3GPPFDD 10-99, User Equipment”类中，选择“WCDMA3G_UE_FixedRate Src”控件，修改其属性，其中“DPDCHGainFactor=1.0”表示打开 DPDCH；“DPCCHGainFactor=0”表示关闭 DPCCH。在“Signal Converters”类中，选择控件；在“Interactive Controls and Displays”类中，选择控件，设置属性。选择、控件，进行变量和仿真设置。利用以上元件，建立如图 18-57 所示电路图。

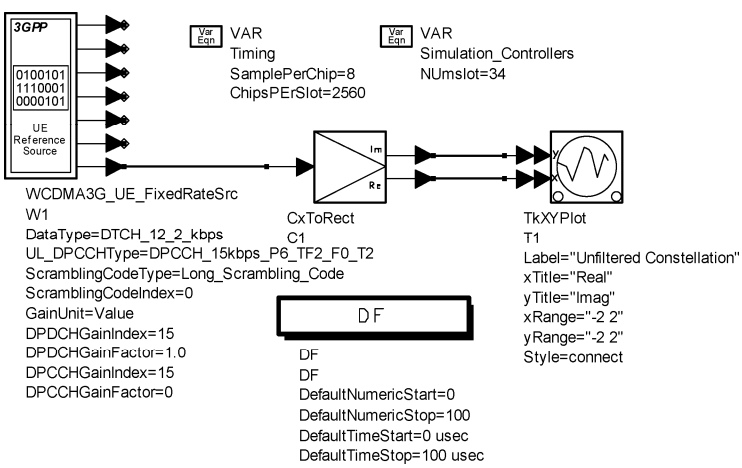


图 18-57　DPDCH 电路原理图

（3）单击工具栏中的控件，进行仿真。仿真结果如图 18-58 所示。这是一个典型的 QPSK 信号。

2．专用物理控制信道（Dedicated Physical Control Channel，DPCCH）

（1）其他保持不变，改变“WCDMA3G_UE_FixedRateSrc”的“DPCCHGainFactor”参数值，设置为 0.5。

（2）重新进行仿真，得到如图 18-59 所示仿真图，这个轨迹与 8PSK 很相似。

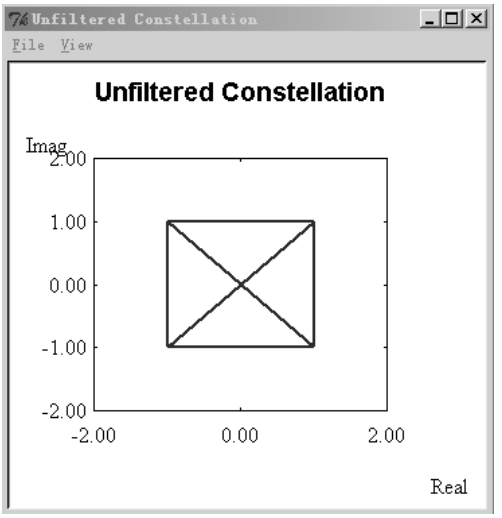


图 18-58　DPDCH 轨迹图

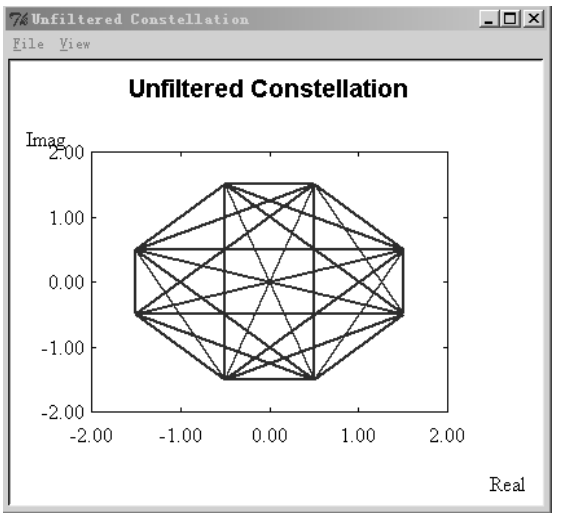


图 18-59　DPCCH 轨迹图

在上节我们讨论下行信道是“WCDMA3G_BS_FixedRateSrc”元件中只有一个 DPCH 参数属性，并不区分 DPCDH 和 DPCCH。由于在下行信道中 DPCDH 和 DPCCH 是时分复用的，而在上行信道中 DPCDH 和 DPCCH 是码分复用的，一般情况下，在上行信道中无论怎样设置 DPCDH 和 DPCCH 的增益值，都没有办法得到 QPSK。但是读者可以通过设置这两个参数的增益值来获得常见的 8PSK、16QAM 等。

3．混合信道（Combined Channel，CC）

读者可以来修改 DPCDH 和 DPCCH 的增益值，再观察仿真图形。这样会得到不同调制方式的信号。

18.5.2　射频功率测量

（1）改回“WCDMA3G_BS_FixedRateSrc” 元件属性，“DPCDH=1”和“DPCCH=0.5”。

（2）另存原理图文件，文件名为“a_UE_src_powerm”。在“Timed RF Subsystems”类中选择控件；在“Interactive Controls and Displays”类中，选择控件；同时，选择、控件，进行变量和仿真设置，并加入 50Ω 电阻及接地。得到电路原理图如图 18-60 所示。

（3）单击工具栏中的控件，进行仿真。结果如图 18-61 所示。

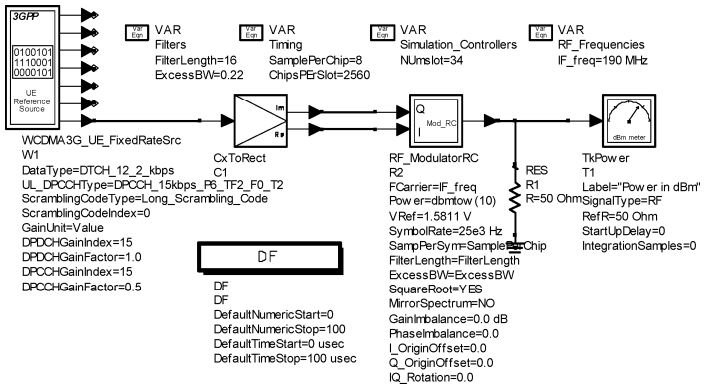


图 18-60　功率测量原理图



图 18-61　功率值

18.5.3　CCDF 测量

1．有 HPSK 信号的 CCDF 测量

（1）在上边电路图的基础上，另存原理图文件，文件名为“a_UE_src_CCDF”。在“Sinks”类中，选择频谱分析控件，其属性设置如图 18-62 所示。

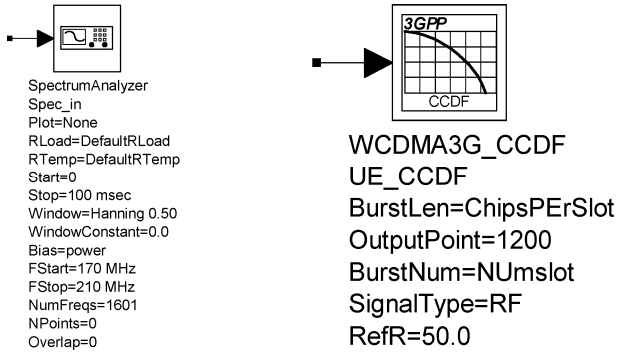


图 18-62　属性设置

> “NumFreqs”表示“FStart”与“FStop”之间等分频率的个数。其设置与“Start”和“Stop”之间的时间间隔有关。如果仿真过程中出现“NumFreqs”警告信息，需调整“Start”和“Stop”参数设置。

（2）在“3GPPFDD 10-99 Measurement”类中，选择控件，并添加新的变量。完整原理图如图 18-63 所示。

（3）单击工具栏中的控件进行仿真。在数据显示窗口中显示仿真曲线，如图 18-64 所示。

2．无 HPSK 信号的 CCDF 测量

（1）在上节原理图的基础上，另存电路图文件，文件名为“a_UE_src_CCDFnhpsk”。在原理图中，单击“WCDMA3G_UE_FixedRateSrc”元件，单击工具栏中的按钮，打开该

元件的内部电路图。在内部电路中，关闭“WCDMA3G_UpLkScrambler”控件。同时，加入部分电路，如图 18-65 所示。

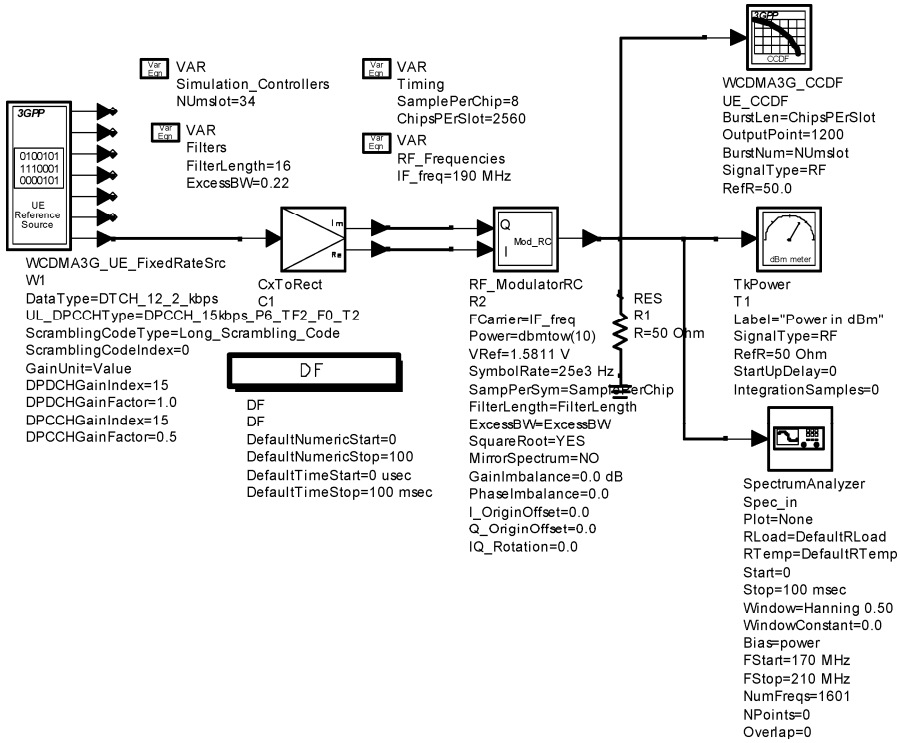
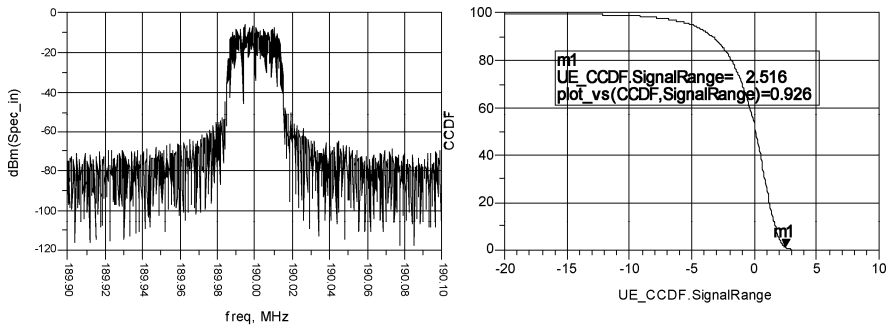


图 18-63　有 HPSK 信号的 CCDF 测量电路原理图



Pwr_in_dBm
9.987

PeakPower	MeanPower	…Mean_dB
13.064	9.997	3.068

图 18-64　仿真曲线

【注意】 不可以保存。若保存就修改了“WCDMA3G_UE_FixedRateSrc”本身功能。

得到的功率为 9.987dBm，与预期的 10dBm 相符，与 CCDF 元件测试的 Mean Power 的 9.997dBm 也相符。同时具有 HPSK 调制时，峰均功率比为 3.068dB。另外也看到，在 1%的概率下信号高于平均功率 2.516dB。

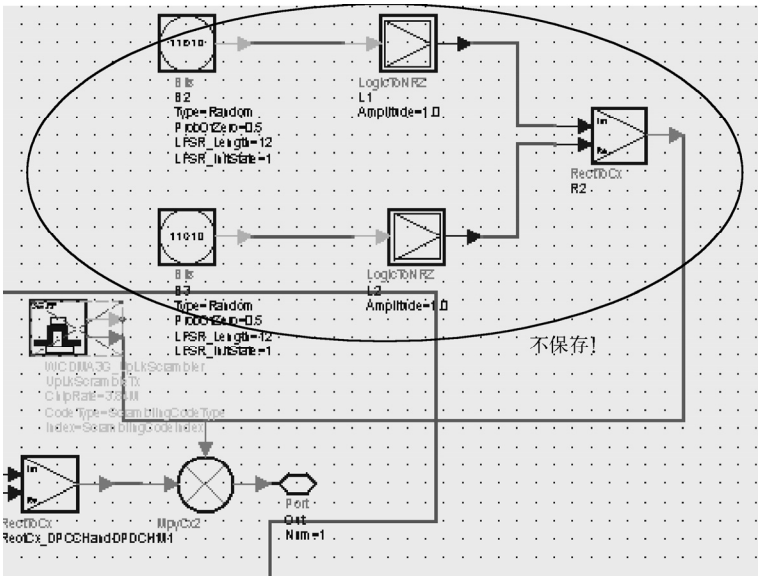
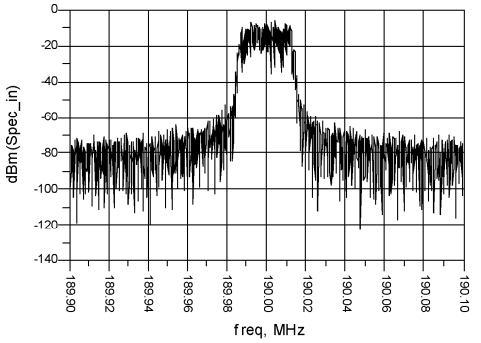
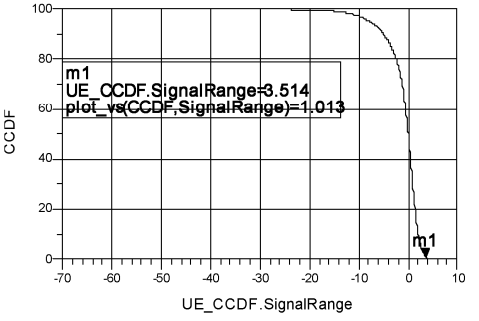


图 18-65　内部电路修改情况

（2）单击工具栏中的按钮，返回原电路图。单击工具栏中的控件，进行仿真。在数据显示窗口中显示仿真曲线，如图 18-66 所示。





Eqn Pwr_in_dBm=spec_power(dBm(Spec_in))

Pwr_in_dBm
9.986

Eqn Peak_to_Mean_dB=PeakPower-MeanPower

PeakPower	MeanPower	...Mean_dB
14.187	9.997	4.190

图 18-66　无 HPSK 信号时 CCDF 测量结果

得到的功率为 9.986dBm，与预期的 10dBm 相符，与 CCDF 元件测试的 Mean Power 的 9.997dBm 也相符。没有 HPSK 调制时，峰均功率比为 4.19dB。同时也看到，在 1%的概率下，信号高于平均功率 3.514dB。由于 HPSK 具有 Walsh 旋转限制了非零符号重复的可能性，从而降低了峰均功率比。

18.6　用户设备发射机仿真

了解如何建立符合 3GPP 标准的用户设备接收机测试系统。测试标准用 TS34.121-v3.1.0

和 TS25.101-v3.3.1；理解 RF sub-networks。

18.6.1 UE 发射机模块

建立 UE 发射机典型模块，在以后的仿真测试中经常要应用。

（1）新建工程，名称为“UE_Tx”。新建原理图文件名称为“UE_Tx_maxpwr”。

（2）在“Timed RF Subsystems”类中选择控件；在“3GPPFDD 10-99 Measurement”类中选择控件；在“Common Components”类表中选择控件。按照如图 18-67 所示连接电路。

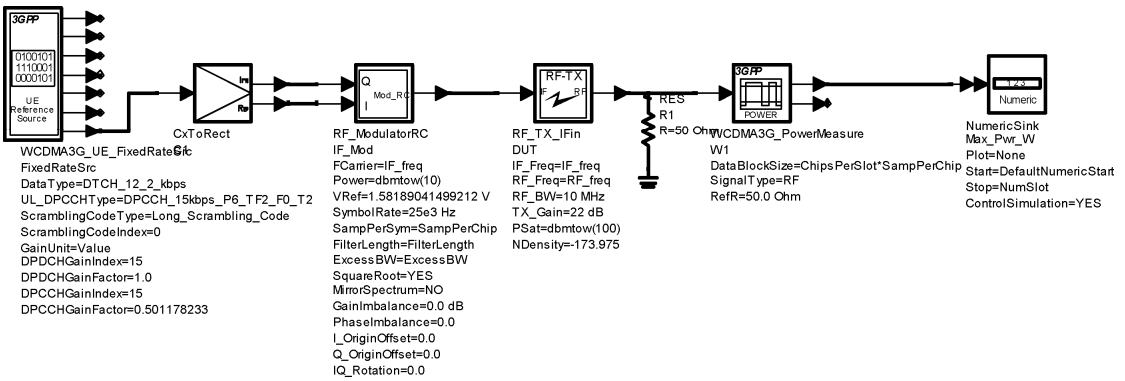


图 18-67 UE 发射机典型模块

18.6.2 最大发射功率

1．最大发射功率的标准要求

【定义】最大发射功率（Maximum Output Power）是通过连续上升功率控制命令驱动 UE 发射最大功率电平衡量 UE 符合相应功率级别的最大发射功率要求。

【标准要求】甚至在多码传输的模式下，应该满足表 18-1 所示的最大输出功率。

表 18-1 W-CDMA 标准要求的最大输出功率

功 率 级 别	最大输出功率	容 差
1	+33dBm	+1/-3dB
2	+27dBm	+1/-3dB
3	+24dBm	+1/-3dB
4	+21dBm	± 2dB

2．利用 WCDMA3G_PowerMeasure 元件对最大输出功率进行测量

（1）在上节电路图的基础上，添加变量及仿真设置。最后仿真结果如图 18-68 所示。

（2）单击工具栏中的控件，进行仿真。仿真结果如图 18-69 所示。

> 与表 18-1 进行对比，已经达到第 2 级功率水平，可以增加“RF_TX_IFin”控件中“TX_Gain”值来改善最大功率值。

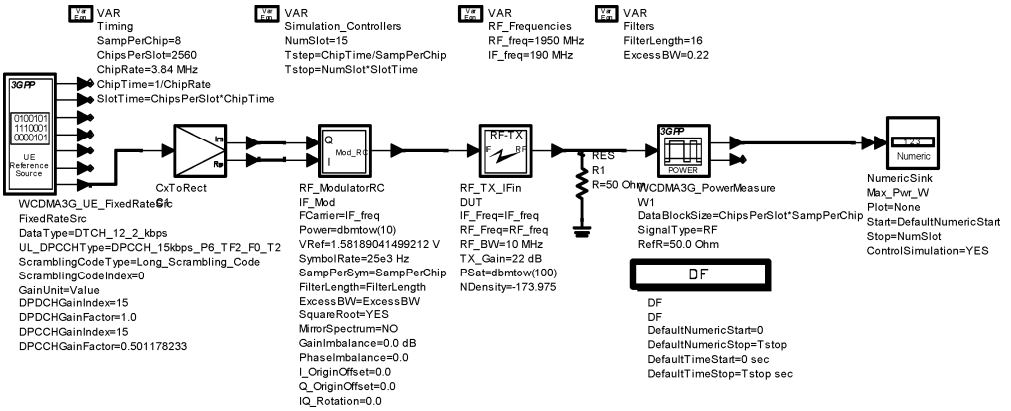


图 18-68　最大输出功率测量原理图

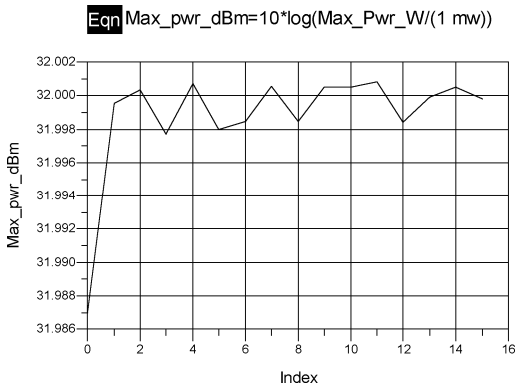


图 18-69　最大输出功率曲线

18.6.3　CCDF 测量

（1）新建原理图文件，名称为“UE_Tx_CCDF”。按照图 18-70 所示建立电路图。

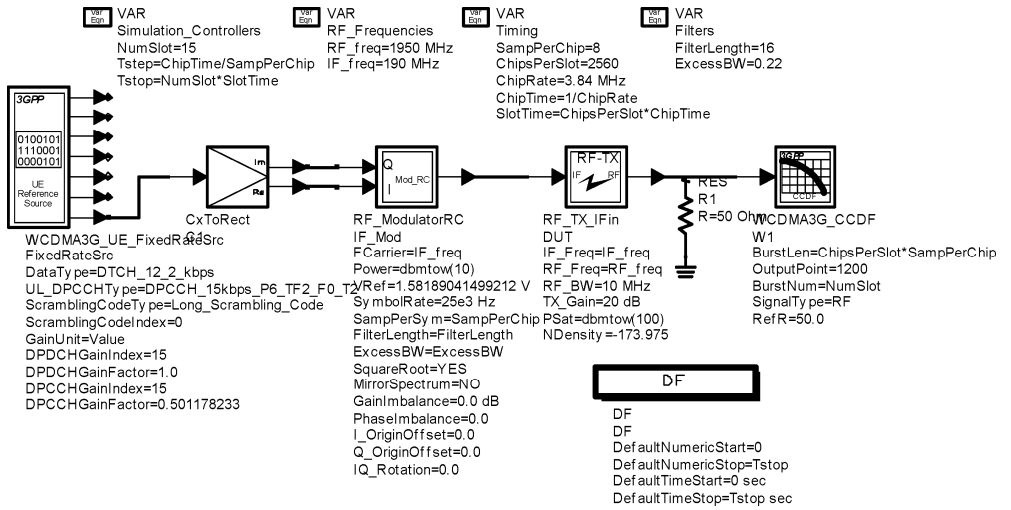
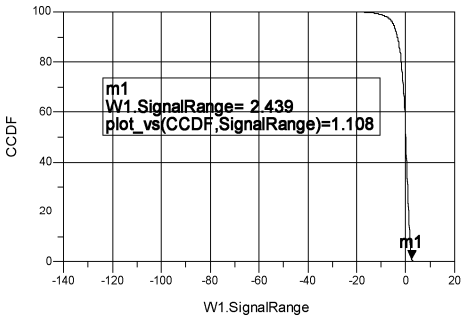


图 18-70　CCDF 测量电路图

（2）进行仿真。打开数据显示窗口，输出 CCDF 曲线。利用公式计算峰均比，如图 18-71 所示。



PeakPower	MeanPower	Peak_to_mean_dB
33.019	30.000	3.019

图 18-71　仿真结果输出

18.6.4　占有带宽

1．占有带宽（OBW）的标准要求

【定义】占有带宽指传输功率谱 99%的频带宽度，中心频率设置在信道发射频率。
【标准要求】小于等于 5MHz，码元速率为 3.84MHz。

2．OBW 测量

（1）新建电路原理图文件，名称为“UE_Tx_OBW”。按照图 18-72 所示连接电路图并设置参数。

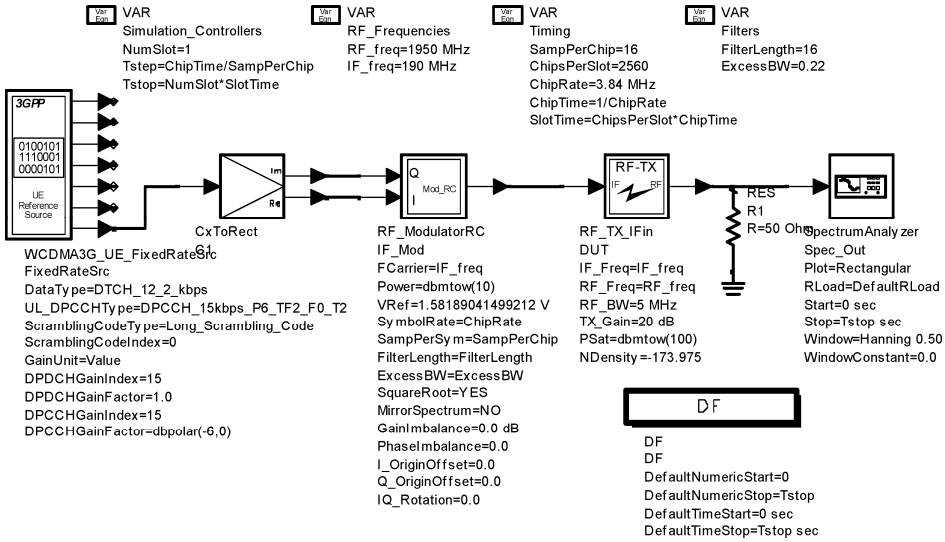


图 18-72　OBW 测量原理图

（2）进行仿真。在“Data Display”窗口中输出仿真曲线和数据，如图 18-73 所示。

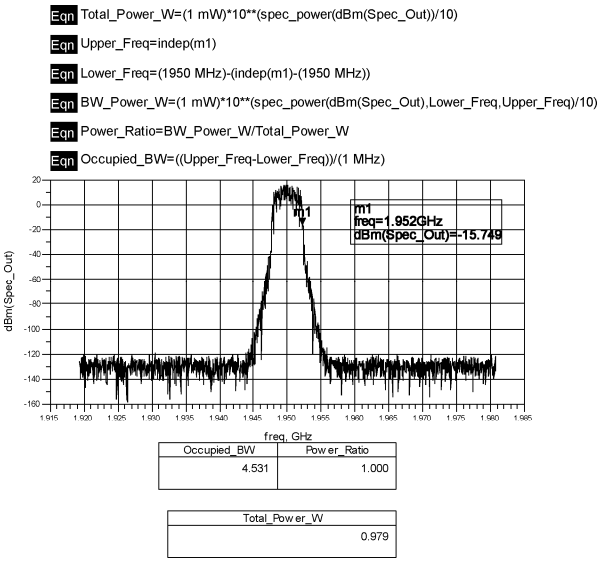


图 18-73　OBW 仿真结果

移动 m1 的位置，使“Power_Ratio”尽可能地接近 0.99，这时“Occupied_BW”为 OBW 的值。从图 18-73 中可以看出 OBW 为 4.531MHz，满足 W-CDMA 标准要求。同时，Power_Ratio 利用带宽内的总功率（以中心频率对称计算）除以信号的总功率计算。另外，利用 indep()函数返回标注点 m1 频率。

3．OBW 的非线性影响

（1）另存原理图文件，文件名为“UE_Tx_OBWnolinear”。修改“RF_TX_IFin”元件“PSat”为+10dB，如图 18-74 所示。

（2）重新进行仿真。输出仿真曲线和数据，如图 18-75 所示。

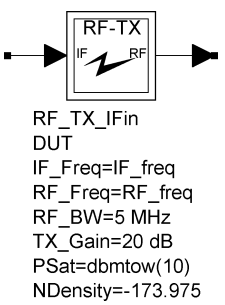


图 18-74　属性修改

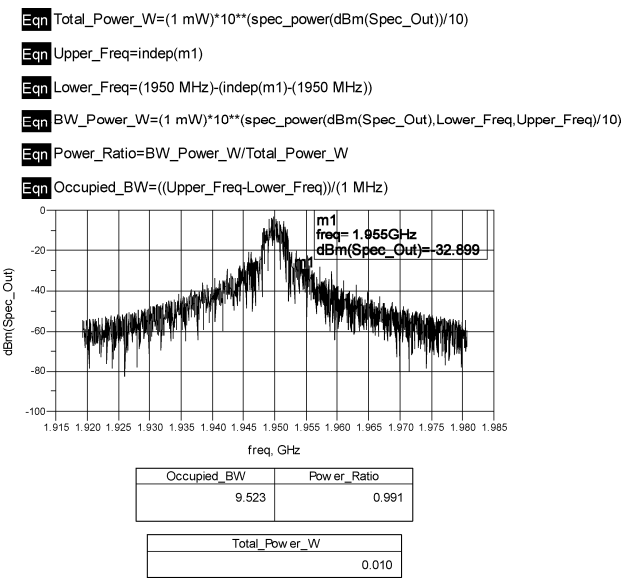


图 18-75　非线性对 OBW 的影响

经过非线性器件后，OBW 增大。图中 m1 99%的带宽为 9.523MHz，超过了标准要求。

18.6.5 频谱杂散模板

1．频率杂散模板（SE Mask）的标准要求

【定义】用户设备提供的频率范围，一般在用户设备载波频率附近 2.5～12.5MHz 之间，限制着用户设备在 3.84MHz 的带宽内输出功率的测量，从而 SE Mask 的单位为“dBc”。

【标准要求】每一个用户设备反射功率不应该超过表 18-2 所示的标准。

表 18-2 SE Mask 最大允许值

以载波为中心的频率偏差 Δf	最大允许值	测 试 带 宽
2.5～3.5MHz	−35～15*（Δf ～2.5）dBc	30kHz
3.5～7.5MHz	−35～1*（Δf ～2.5）dBc	1MHz
7.5～8.5MHz	−39～10*（Δf ～2.5）dBc	1MHz
8.5～12.5MHz	−49dBc	1MHz

2．SE Mask 参考值建立

由于 SE Mask 测量需要与标准值进行比较，所以建立参考标准非常关键，按照表 18-2 所给的范围来确定参考值，用以比较真正测试结果。

（1）另存电路原理图文件，名称为“UE_Tx_SEmask_Def”。

（2）在工具栏中选择 按钮，定义“Mask_dBc”变量，该变量利用嵌套 if…then…else 语句，完成表 18-2 的描述，这是参考值是否建立成功的关键。

Mask_dBc=if(abs(Delta_freq)<(2.5MHz))then(0)else(if(abs(Delta_freq)<(3.5MHz))then(−35−15*(abs(Delta_freq) −2.5))else(if(abs(Delta_freq)<(7.5MHz))then(−35−1*(abs(Delta_freq) −3.5))else(if(abs(Delta_freq)<(8.5MHz))then(−39−10*(abs(Delta_freq) −7.5))else(if(abs(Delta_freq)< (12.5MHz))then (−49) else (0) endif)endif)endif) endif)endif

（3）在上步中涉及“Delta_freq”变量，所以再单击 按钮，建立另外一个变量，如图 18-76 所示。同时建立扫描平面“SweepPlan”，属性设置如图 18-77 所示。

VAR
Swept_Measurement
RBW1=30 kHz
Delta_freq=12.5 MHz
RBW2=1 MHz
RBW=if (abs(Delta_freq)<(3.5 MHz)) then (RBW1) else (RBW2) endif

图 18-76 变量设置

SWEEP PLAN
SweepPlan
Plan1
Start=4 MHz Stop=12 MHz Step=RBW2 Lin=
Start=2.515 MHz Stop=3.485 MHz Step=RBW1 Lin=
Start=-3.485 MHz Stop=-2.515 MHz Step=RBW1 Lin=
Start=-12 MHz Stop=-4 MHz Step=RBW2 Lin=
UseSweepPlan=
SweepPlan=
Reverse=no

图 18-77 SweepPlan 设置

（4）在“Controllers”类中选择 控件，仿真等式的设置如图 18-78 所示。

（5）在“Controllers”类中选择 控件，进行参数扫描设置，如图 18-79 所示。

（6）进行仿真。仿真约需 3min。输出仿真结果，如图 18-80 所示。

MeasEqn
Meas_Def
Ch_L_index=find_index(Delta_freq,(-2.515 MHz))
Ch_H_index=find_index(Delta_freq,(2.515 MHz))
mask_L_dBc=mask_dBc[0::Ch_L_index,0]/(1 MHz)
mask_H_dBc=mask_dBc[Ch_H_index::sweep_size(Delta_freq)-1,0]/(1 MHz)
Delta_freq_L=Delta_freq[0::Ch_L_index]
Delta_freq_H=Delta_freq[Ch_H_index::sweep_size(Delta_freq)-1]

图 18-78　仿真等式设置

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
Sweep1
SweepPlan="Plan1"
SweepVar="Delta_freq"
SimInstanceName[1]="DF"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=

图 18-79　参数扫描设置

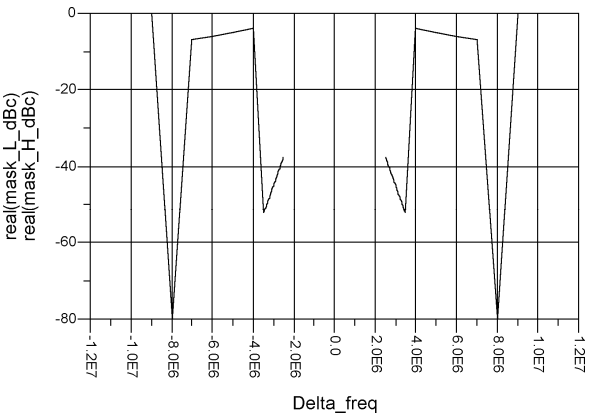


图 18-80　SE Mask 标准参考值

3．SE Mask 测量

（1）另存为原理图文件，名称为“UE_Tx_SEmask_Meas”，利用“WCDMA3G_Power Measure”元件，按照图 18-81 所示进行连接和属性设置。

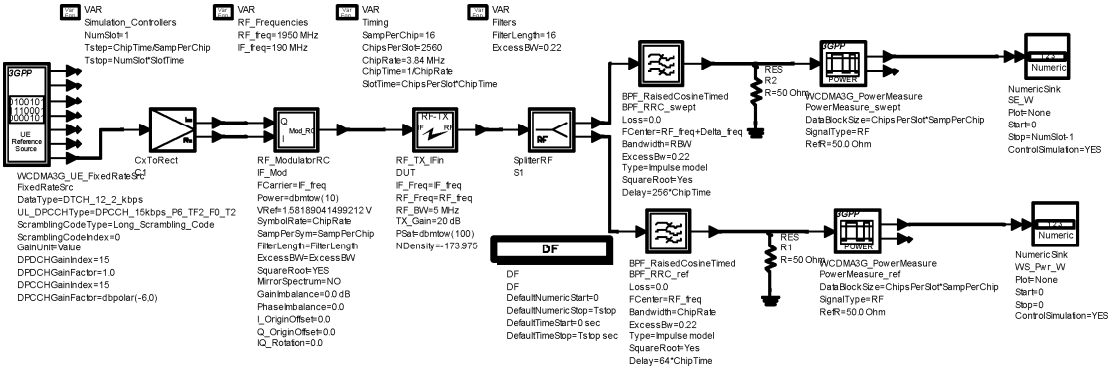


图 18-81　SE Mask 测量原理图

（2）保持上节电路图不变，进行仿真。仿真约需 5min。输出仿真数据，如图 18-82 所示。

测量结果与标准参考值绘制到一个图中，可以进行对比。同时建立一个判断输出，如果符合标准要求，仿真结果中出现“PASS”；如果不符合标准，仿真结果中出现“Fail”。

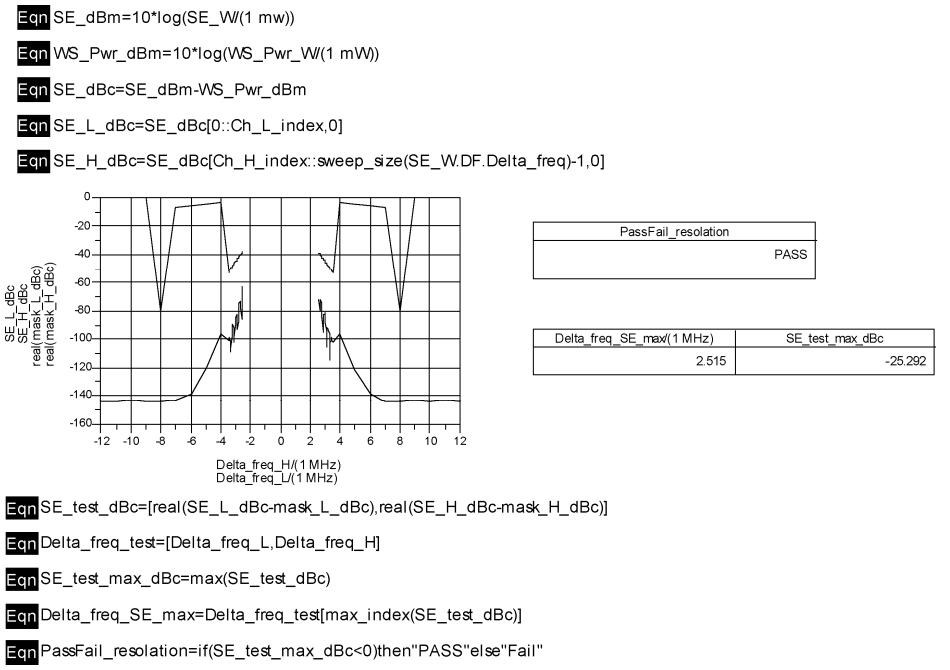


图 18-82　SE Mask 测量结果

18.6.6　相邻频道泄漏比

1．相邻频道泄漏比（ACLR）的标准要求

【定义】相邻频道泄漏比（Adjacent Channel Leakage Ratio，ACLR）是用来衡量规定使用传输频道以外，传输 RF 能量的一个指标，由输出功率放大器产生，由于会发生干扰并且破坏规定的需求，因此必须准确加以测量。ACLR 在第二代移动电话的应用中称为 ACPR。

【标准要求】在相邻信道输出功率≥-50dBm 时，ACLR 应该高于表 18-3 所示的值。

表 18-3　用户 ACLR 值

功 率 级 别	用 户 信 道	ACLR 极限值
3	+5MHz or -5MHz	33dB
	+10MHz or -10MHz	43dB
4	+5MHz or -5MHz	33dB
	+10MHz or -10MHz	43dB

2．在稳定条件下 ACLR 的测量

（1）建立新原理文件，名称为“UE_Tx_ACLR”。按照图 18-83 所示建立连接，并设置参数。

> 在 WCDMA3G 工具箱中，提供了 ACLR 测量控件，可以单击元件搜索，找到该元件。其“SlotNum”属性设置为 1，否则会影响仿真时间。同时，“RF_TX_IFin”元件中的“PSat”属性应只为+100dB。

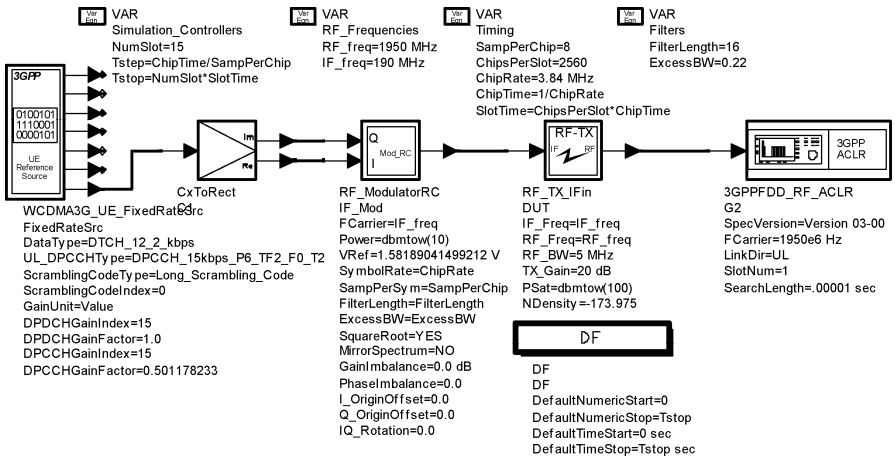
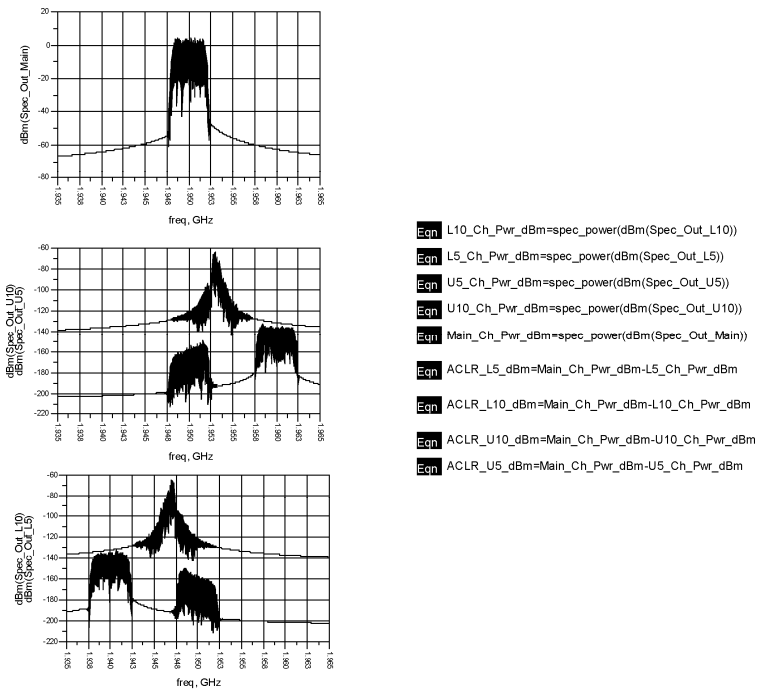


图 18-83　在稳定条件下 ACLR 的测量原理图

（2）进行仿真。结果输出如图 18-84 所示。



ACLR (dB)

ACLR_L10_dBm	ACLR_L5_dBm	ACLR_U5_dBm	ACLR_U10_dBm
138.558	77.920	77.362	138.428

Channel Power (dBm)

L10_Ch_Pwr_dBm	L5_Ch_Pwr_dBm	Main_Ch_Pwr_dBm	U5_Ch_Pwr_dBm	U10_Ch_Pwr_dBm
-108.862	-48.225	29.695	-47.667	-108.733

图 18-84　稳定状态下 ACLR 结果输出

从图 18-84 中可以看出，下 10MHz 带宽（ACLR_L10）的 ACLR =138.558dBm，下 5MHz 带宽（ACLR_L5）的 ACLR =77.920dBm，上 10MHz 带宽（ACLR_U10）的 ACLR =138.428dBm，上 5MHz 带宽（ACLR_U5）的 ACLR =77.362dBm，均大于表 18-3 中所示的 ACLR 极限值。

3．非线性器件对 ACLR 的影响

另存原理图文件，名称为“UE_Tx_ACLRnolinear”。修改“RF_TX_IFin”元件中的“PSat”属性应只为+10dB。重新仿真。结果输出如图 18-85 所示。

> 对比图 18-84 可以看出，所有的 ACLR 的值都在下降，已经不满足表 18-3 中的要求。非线性器件对 ACLR 有很大影响。

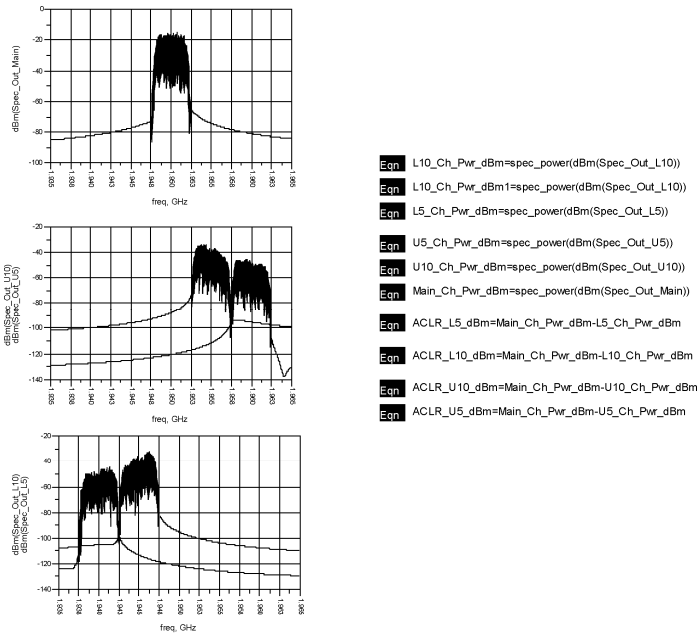


图 18-85　非线性器件对 ACLR 的影响

18.6.7　误差向量幅度

1．误差向量（EVM）的标准要求

【定义】误差向量（包括幅度和相位的矢量）是在一个给定时刻理想无误差基准信号与实际发射信号的向量差。

【标准要求】在表 18-4 所要求的参数设置下，EVM 超过 17.5%。

表 18-4　EVM 参数设置

参　　数	值/状态	单　　位
输出功率	≥-20	dBm
功率控制的步长	1	dB
执行状态	正常状态	

2．EVM 测量

（1）新建原理图文件，名称为“UE_Tx_EVM”。按照图 18-86 所示建立原理图连接，并进行相应的属性设置。

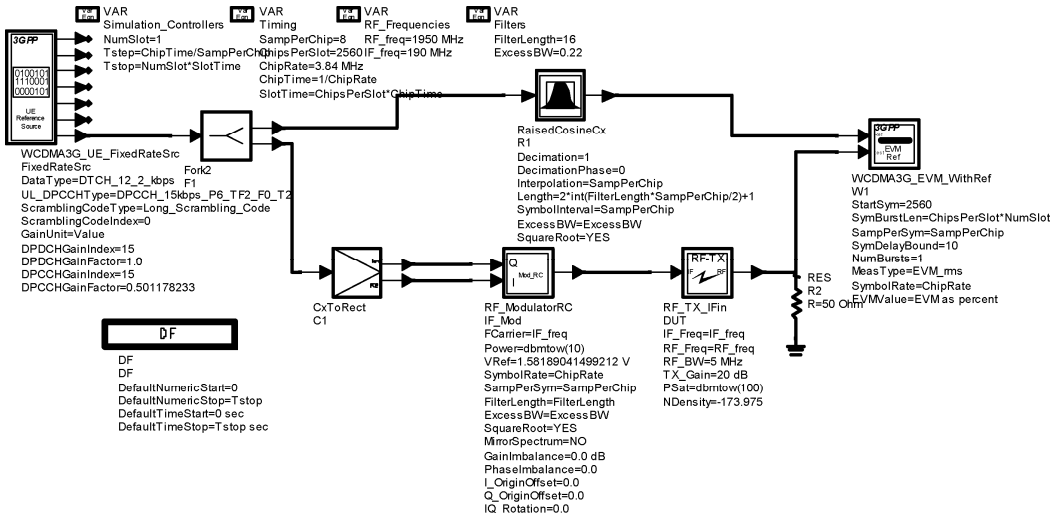


图 18-86　EVM 测量原理图

> 利用“WCDMA3G_EVM_WithRef”元件进行 EVM 测试，该元件在 WCDMA3G 元件库中可以找到。

（2）进行仿真。输出结果如图 18-87 所示。

> 图 18-86 可知，“RF_BW=5MHz”时 EVM 值符合标准要求，修改后 EVM 值升高，对该值影响较大。

（3）修改“RF_TX_IFin”元件中“RF_BW=3.5MHz”。重新仿真，输出结果如图 18-88 所示。

Index	EVM
41039	3.181

图 18-87　EVM 输出结果

Index	EVM
41039	19.177

图 18-88　修改后 EVM 输出结果

18.6.8　码域功率谱

码域功率（Code Domain Power，CDP）是对 CDMA 信号中每个 Walsh 编码的信道功率的测量。CDP 测量方法对 CDMA 发射机的故障检测和修复有很大益处。

（1）新建电路原理图文件，名称为“UE_Tx_CDP”。按照图 18-89 所示建立电路连接和参数设置。

> 利用“WCDMA3G_CodeDomainPwr”元件来测试 CDP，其中“SF=256”设定频率级为 256 级。该级别的设定影响仿真时间。

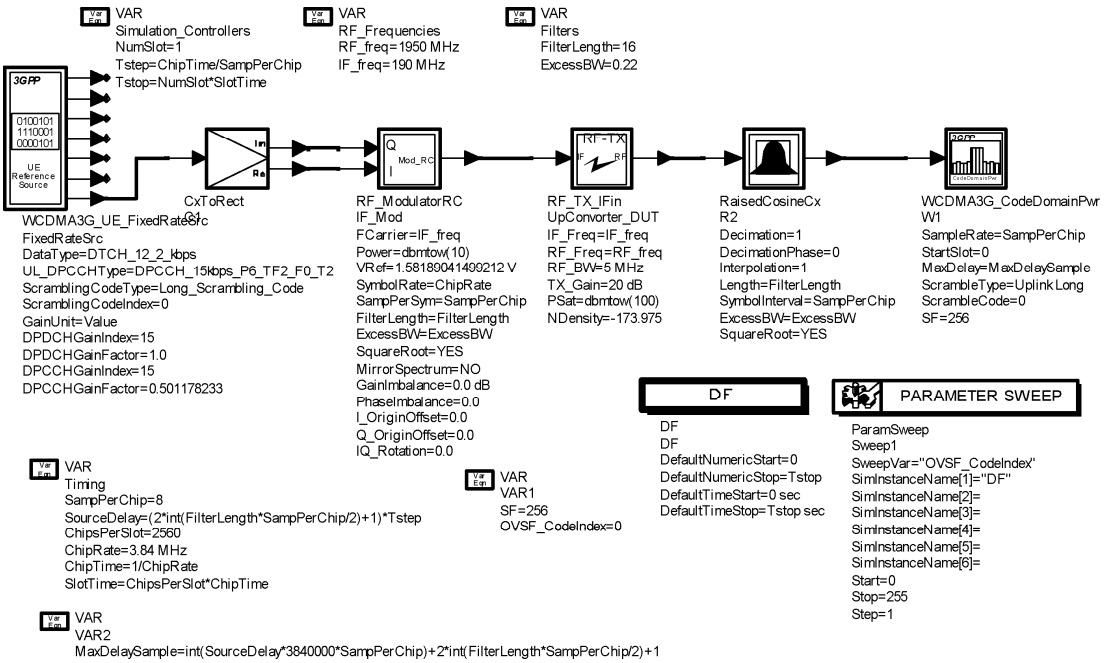


图 18-89　CDP 测试原理图

（2）进行仿真，仿真时间约需 20min。仿真输出结果如图 18-90 所示。

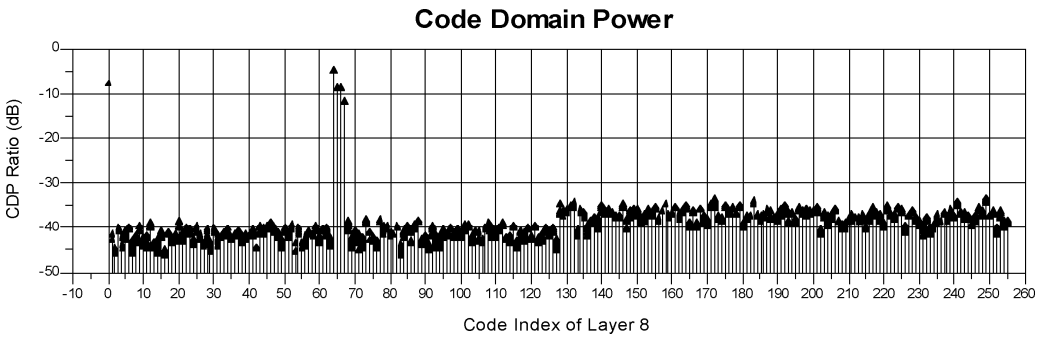


图 18-90　仿真输出结果

18.6.9　峰值码域误差

1．峰值码域误差（PCDE）的标准要求

【定义】峰值码域误差是指码域中误差矢量的最大值。其中，码域矢量误差是指一个码字信号的平均功率与码域中除该码字之外的其余码字信号的平均功率之比。

【标准要求】峰值码域误差小于等于-15dB。

2．PCDE 的测量

（1）新建原理图文件，文件名为“UE_Tx_Pk_Code_Error”。按照图 18-91 所示建立连接及修改属性。

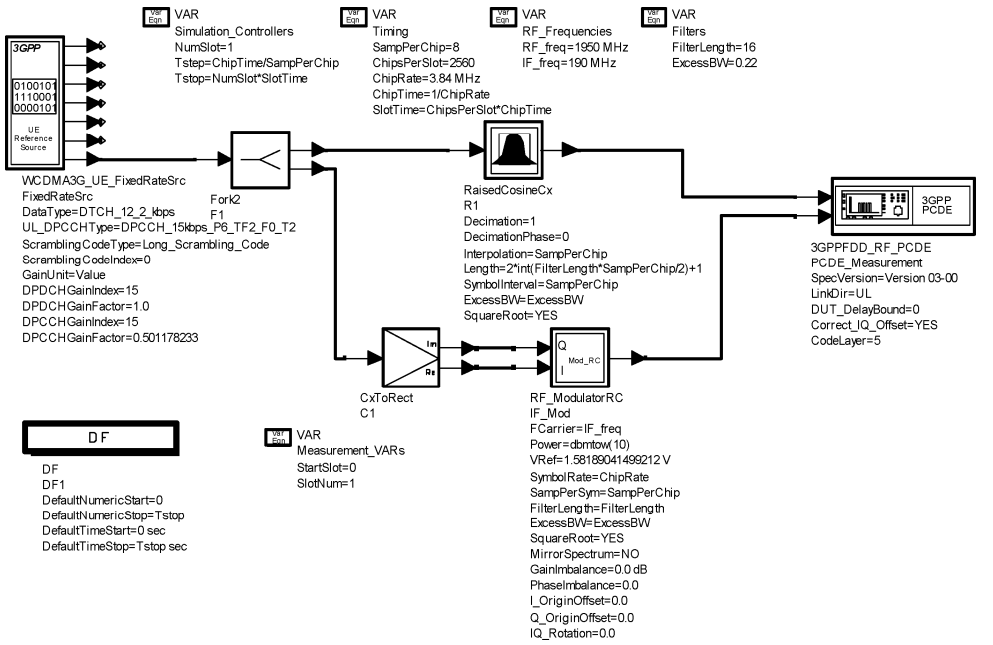


图 18-91　PCDE 测试原理图

（2）进行仿真。结果输出如图 18-92 所示。

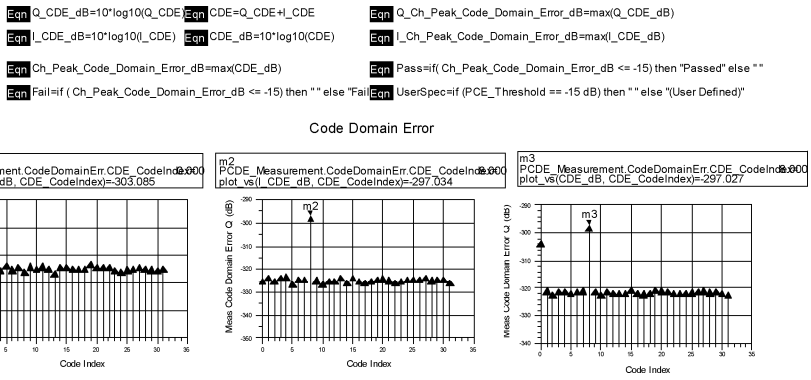


图 18-92　PCDE 结果输出

（3）进行仿真结果与标准值比较，如图 18-93 所示。

Peak Code Domain Error

Q_Ch_Peak_Code_Domain_Error_dB
-303.085

I_Ch_Peak_Code_Domain_Error_dB
-297.034

Ch_Peak_Code_Domain_Error_dB
-297.027

Specification Requirements	Test results
The Peak Code Domain Error shall not exceed -15 dB	Passed

图 18-93　PCDE 测试判断

18.7 用户设备接收机仿真

18.7.1 UE 接收机模块

（1）新建工程，名称为“3gpp_UE_Tx”。新建原理图文件，名称为“UE_Rx_Verification”。利用“WCDMA3G_BS_FixedRateSrc”元件进行 UE 接收机测试。在相应的类中选择控件，按照图 18-94 所示进行连接并设置属性。

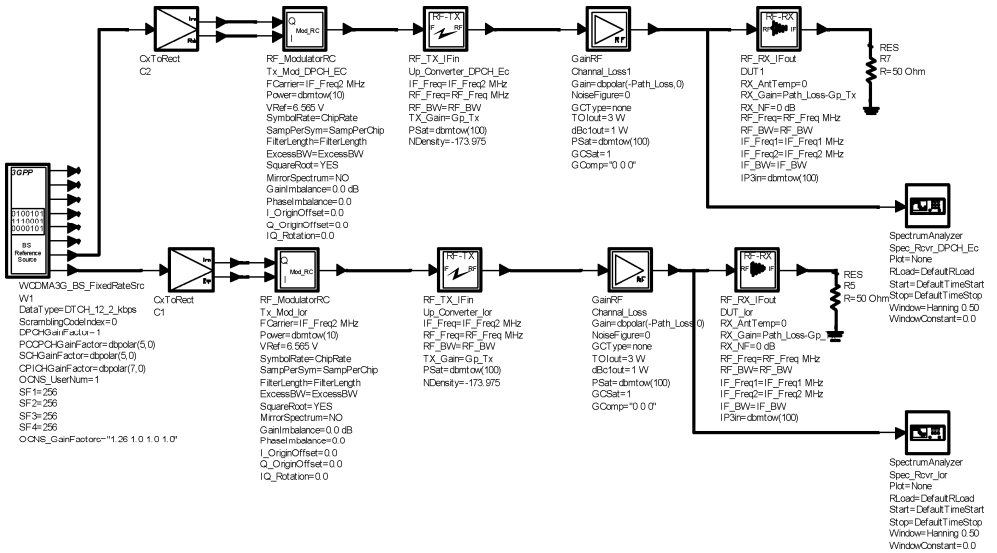


图 18-94 UE 接收机测试原理图

> “WCDMA3G_BS_FixedRateSrc”的 1 端口输出混合信号，2 端口输出 DPCH 信号，用来测试两种信号输出功率差。

（2）进行变量及仿真设置，如图 18-95 所示。

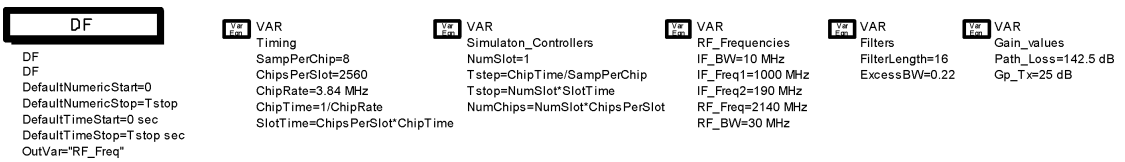


图 18-95 变量及仿真设置

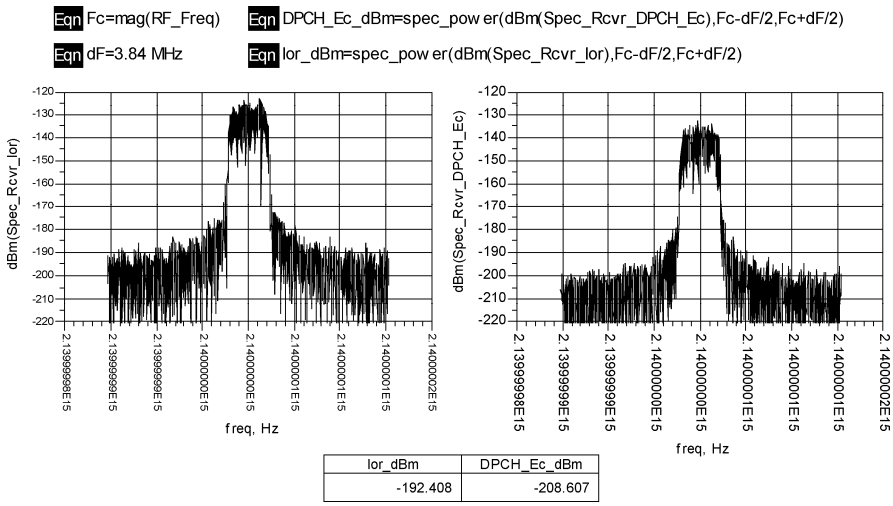
（3）进行仿真。输出仿真波形及数据，如图 18-96 所示。

> 从图 18-96 中可以看出，混合信号功率输出（Ior_dBm）比 DPCH 信号功率输出（DPCH_Ec_dBm）高 16.2dBm。

18.7.2 CCDF 测量

（1）新建原理图文件，名称为“UE_Rx_CCDF”。利用“WCDMA3G_CCDF”元件，按

照图 18-97 所示连接元件，并设置属性。



Ior_dBm	DPCH_Ec_dBm
-192.408	-208.607

图 18-96　输出仿真波形及数据

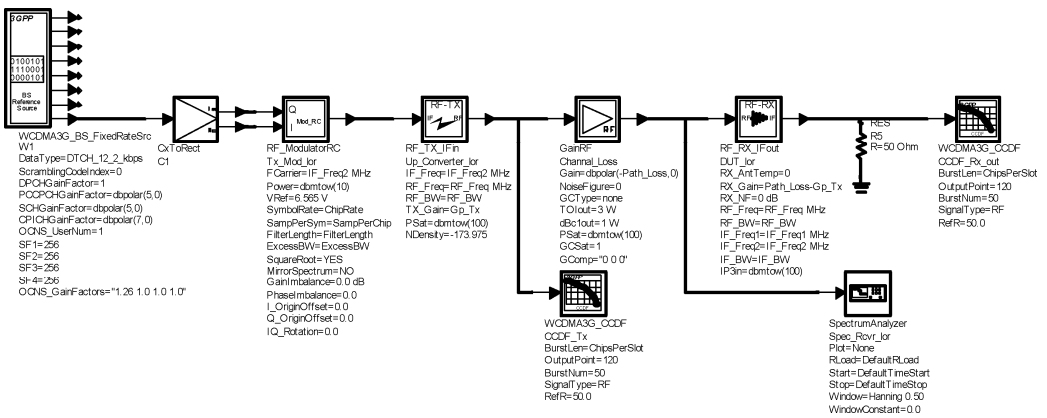


图 18-97　CCDF 测试原理图

（2）变量和仿真设置不用改动，延用上节设置。进行仿真。图形和数据输出如图 18-98 所示。

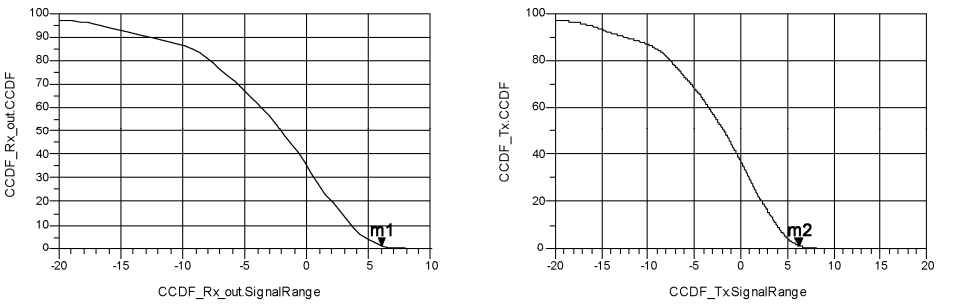


图 18-98　发射端和接收端 CCDF 比较

从图中可以看出，发送端和接收端 CCDF 数值相仿，变化不大。

18.7.3 参考灵敏度

1．参考灵敏度的标准要求

【定义】参考灵敏度（Reference Sensitivity Level）是测量 UE 在制定误码率 BER 门限下的最小接收信号电平。参考灵敏度是接收机设计的重要指标，接收机前端器件和模块的噪声系数是影响参考灵敏度的主要因素。同时参考灵敏度电平也是各项接收机性能测试的基本参数设置。

【标准要求】在表 18-5 所示的参数要求下，误码率 BER 不超过 0.001。

表 18-5 参考灵敏度测试参数

参 数	单 位	水 平 值
DPCH_Ec	dBm/3.84 MHz	-117
lor	dBm/3.84 MHz	-106.7

2．参考灵敏度测试

（1）新建原理图文件，名称为“UE_Rx_ReSL”。按照图 18-99 所示建立电路原理图，并设置属性。进行仿真。该仿真耗时约 20min。输出结果如图 18-100 所示。

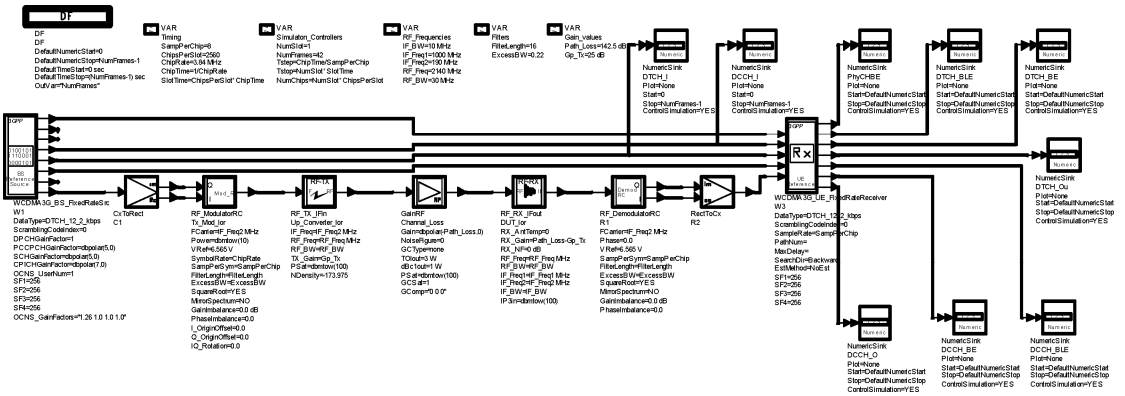


图 18-99 参考灵敏度测试电路

real(FCarrier)/(1 MHz)	real(DPCH_Ec_dBm)	real(Ior_Power_dBm)	real(SourceR)
2140.000	-117.000	-106.700	50.000

Meas BER Results

DTCH_AverageBER	DCCH_AverageBER	DPCH_AverageBER
0.000	0.000	0.113

Specification requirements	Test results
The DTCH and DCCH BER shall not exceed 0.001 according to TS 25.101	Passed

图 18-100 参考灵敏度输出结果

（2）其中与标准进行了对比。对比数据计算及输出如图 18-101 所示。

从图中可以看出平均 BER 已经达到标准要求。

```
Eqn BER_Threshold = 0.001

Eqn DTCH_AverageBER=DTCH_BER[real(FrameNum)-1]
Eqn DCCH_AverageBER=DCCH_BER[real(FrameNum)-1]
Eqn DPCH_AverageBER=DPCH_BER[real(FrameNum)-1]

Eqn DTCH=if (DTCH_AverageBER<BER_Threshold) then 1 else 0
Eqn DCCH=if (DCCH_AverageBER<BER_Threshold) then 1 else 0

Eqn Pass = if (DTCH&&DCCH) then "Passed" else " "
Eqn Fail = if (DTCH&&DCCH) then " " else "Failed"
Eqn UserSpec=if (abs(BER_Threshold - 0.001) < 1e-6) then " " else "(User Defined)"

Eqn Spec= if(real(Spec_Version)==0) then "(2000-03)" else ( if(real(Spec_Version)==1) then "(2000-12)" else "(2002-03)")

Eqn DPCH_Ec_dBm=real(Ec_2_Ior_dB)+real(Ior_Pow er_dBm)
Eqn Eb_dBm=real(DPCH_Ec_dBm)+10*log10(128*343*2/244)-10*log10(3.84e6)

Eqn T = real(RX_Temp)+273.15
Eqn k = boltzmann      Eqn N0_dBm = 10*log10(k * T) + 30
```

图 18-101　对比数据计算及输出

18.7.4　最大输入电平

1．标准要求

【定义】最大输入电平（Maximum Input Level）是测量 UE 在指定误码率 BER 门限下的最大接收信号电平，也称为可用输入范围或动态范围，用于衡量接收机在大信号电平输入条件下产生非线性失真对接收 BER 的影响。

【标准要求】BER 不超过 0.001 时，在最大输入电平时测试参数标准如表 18-6 所示。

表 18-6　最大输入电平时测试参数标准

参　　数	水平/状态	单　　位
I_{or}	-25	dBm/3.84MHz
$\frac{DPCH-E_c}{I_{or}}$	-19	dB

2．源校准

（1）打开原理图“UE_Rx_Verification”文件，并另存为“UE_Rx_MInLVerification”。

（2）修改元件属性，进行变量设置，如图 18-102 所示。

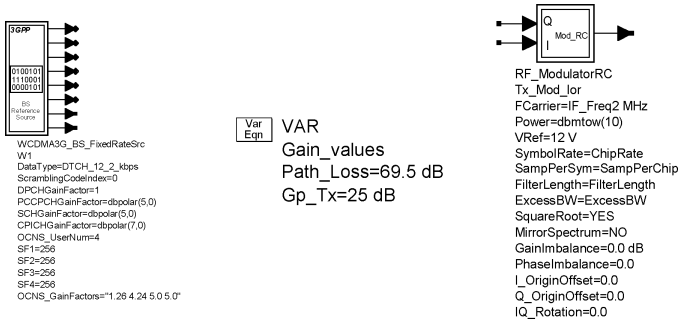
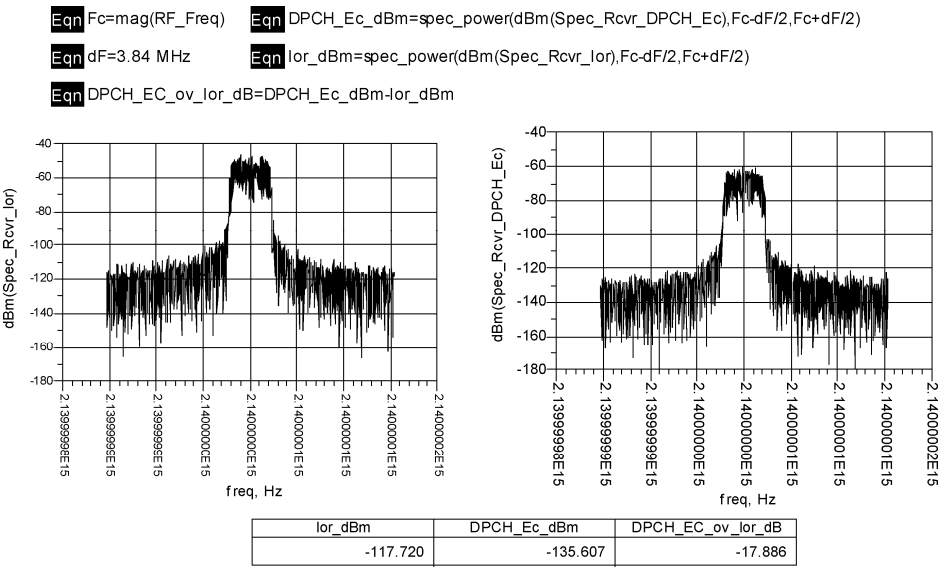


图 18-102　修改元件及变量属性

（3）重新进行仿真，如图 18-103 所示。



Ior_dBm	DPCH_Ec_dBm	DPCH_EC_ov_Ior_dB
-117.720	-135.607	-17.886

图 18-103　仿真结果

> “DPCH_EC_ov_Ior_dB”表示“DPCH_Ec_dBm”与“Ior_dBm”的差值，为-17.886dB，高于-19dB，满足标准要求。

3．测试

（1）打开原理图文件“UE_Rx_RefSL”，另存为“UE_Rx_MaxInputLM”。按照图 18-102 所示修改元件及变量属性。

（2）重新进行仿真。仿真耗时约 40min。进行数据输出设置，如图 18-104 所示。

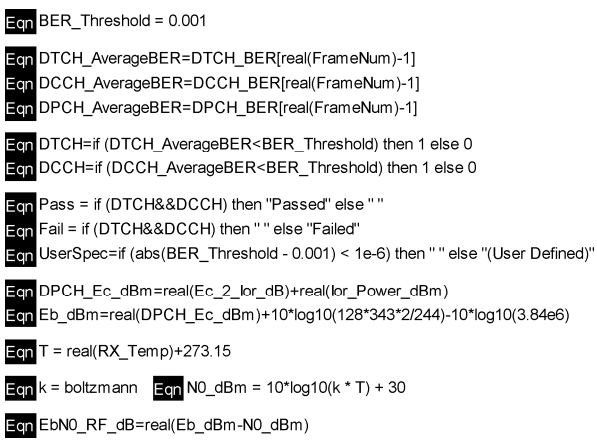


图 18-104　数据输出设置

（3）得到仿真结果，如图 18-105 所示。

> 在源校准的水平下，BER 为 0.000，小于 0.001 的技术标准。

Meas BER Results

DTCH_AverageBER	DCCH_AverageBER	DPCH_AverageBER
0.000	0.000	0.000

Specification requirements

The DTCH and DCCH BER shall not exceed 0.001 according to TS 25.101

Test results

Passed

图 18-105　最大输入电平仿真结果

18.7.5　邻道选择性

1．标准要求

【定义】邻道选择性（Adjacent Channel Selectivity，ACS）用于衡量在有较强邻道干扰的条件下 WCDMA UE 的接收性能。ITU 定义了超过百兆的 WCDMA 频谱，一个 WCDMA 载波带宽为 5MHz，可以通过频分的方法连续使用多个 WCDMA 载波以提高系统容量，因此网络中会出现 WCDMA 载波相邻且电平相差很大的情况。邻道选择性测试是为了保证 WCDMA UE 在未来复杂的网络环境中能够实现需要的接收质量。

【标准要求】对于第 3、4 功率级别，在表 18-7 所示的参数制约下，BER 不应该超过 0.001。这种测试条件 ACS 值为 33dB。

表 18-7　ACS 测试参数

参　数	水平/状态	单　位
DPCH_Ec	-103	dBm/3.84 MHz
Ior	-92.7	dBm/3.84 MHz
L_{oac}	-52	dBm/3.84 MHz
F_{uw}	-5 或+5	MHz

2．源校准

（1）打开原理图“UE_Rx_Verification”文件，并另存为“UE_Rx_ACSVerification”。修改元件属性，进行变量设置，如图 18-106 所示。

Var Eqn
VAR
Gain_values
Path_Loss=128.5 dB
Gp_Tx=25 dB

图 18-106　元件属性及变量设置

（2）调整“Tx_Mod_DPCH_Ec”元件的“VRef=0.48mV”，以及“Tx_Mod_Ior”元件的“VRef=3.85mV”。重新进行仿真，如图 18-107 所示。

📖 从图 18-107 中可以看出，通过调整“VRef”使源达到 ACS 测试的标准。

3．测试

（1）打开“UE_Rx_ReSL”原理图，另存为“UE_Rx_ACS”。在主电路图中，加入“RF_Combiner”元件，按图 18-108 所示的连接方式和属性进行设置。

（2）加入新的变量，如图 18-109 所示。

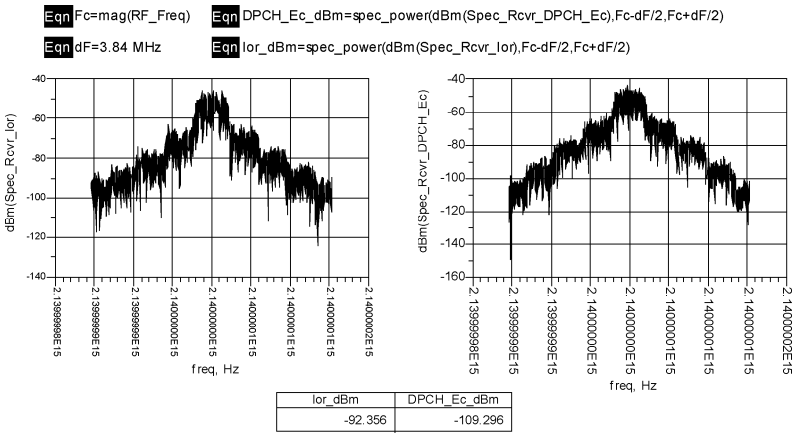


图 18-107　ACS 源测试结果

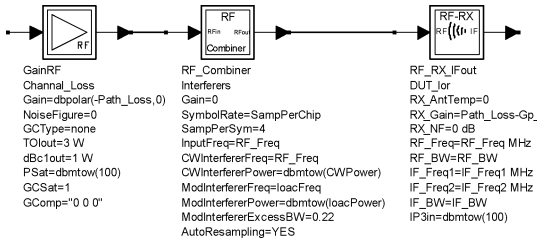


图 18-108　添加的元件

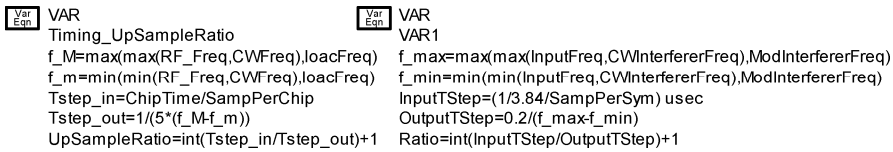


图 18-109　新添加的变量

（3）修改“WCDMA3G_UE_FixedRateReceiver”元件的“SampleRate=SampPerChip*UpSampleRatio”的属性，使其满足 ACS 测试要求。进行仿真。仿真需要耗时约 1h。仿真结束后，进行数据输出设置，如图 18-110 所示。

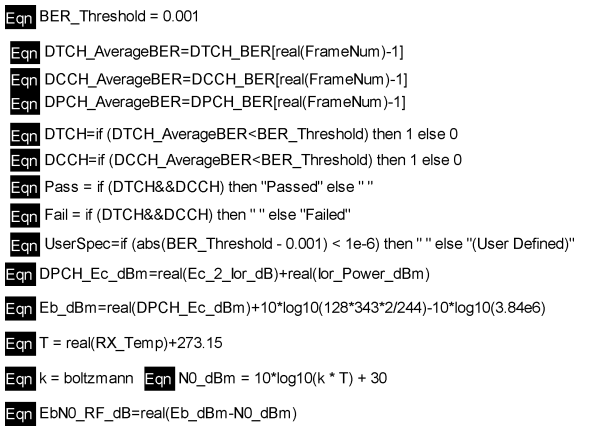


图 18-110　数据输出设置

（4）仿真结果输出，如图 18-111 所示。

> 可以看出在 DPCH_Ec_dBm=-103dBm/3.84MHz，lor_dBm=-92.7dBm/3.84MHz 时，BER 都是零，符合小于 0.001 的技术标准。

Meas BER Results

DTCH_AverageBER	DCCH_AverageBER	DPCH_AverageBER
0.000	0.000	0.000

Specification requirements	Test results
The DTCH and DCCH BER shall not exceed 0.001 according to TS 25.101	Passed

图 18-111　ACS 测试结果

18.7.6　阻塞特性测试

1．标准要求

【定义】阻塞特性（Blocking Characteristics）用于衡量在 WCDMA 频段内或频段外存在强信号干扰的条件下 WCDMA UE 的接收性能。阻塞特性一般用于模拟特定发射机针对 WCDMA UE 的干扰。

【标准要求】在表 18-8 要求的阻塞特性参数设置下，BER 不超过 0.001。

表 18-8　阻塞特性测试参数

参　数	10MHz 偏差	15MHz 偏差	单　位
DPCH_Ec	-114	-114	dBm/3.84MHz
lor	-103.7	-103.7	dBm/3.84MHz
$L_{blocking}$	-56	-44	dBm/3.84MHz
F_{uw}	+10 or -10	+15 or -15	MHz

2．源校准

（1）打开原理图“UE_Rx_Verification”文件，并另存为“UE_Rx_BCVerification”。修改元件属性，进行变量设置，如图 18-112 所示。

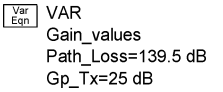


图 18-112　元件属性及变量设置

（2）调整“Tx_Mod_DPCH_Ec”元件的“VRef=0.45mV”，以及“Tx_Mod_lor”元件的“VRef=1.48mV”。重新进行仿真，如图 18-113 所示。

> 从图 18-113 中可以看出，通过调整“VRef”使源达到测试的标准。

3．测试

（1）打开“UE_Rx_ACS”原理图，另存为“UE_Rx_BC”。修改变量设置，如图 18-114 所示。

（2）进行仿真。仿真需要耗时约 1h。仿真结束后，进行数据输出设置，与图 18-110 一

致。仿真结果输出如图 18-115 所示。

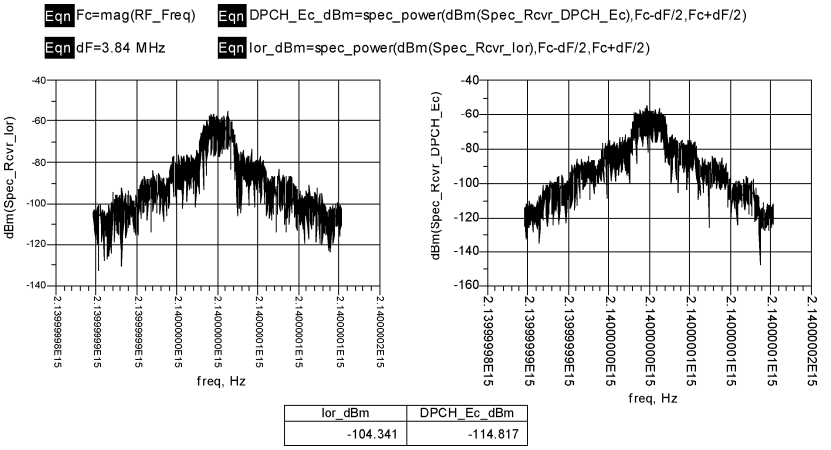


图 18-113　阻塞特性源测试结果

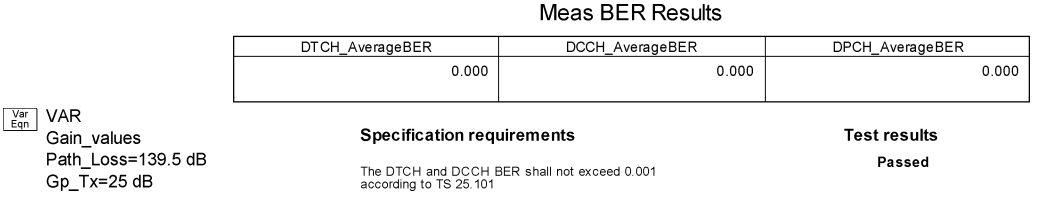


图 18-114　修改变量设置　　图 18-115　BC 测试结果

> 可以看出在 DPCH_Ec_dBm=−114.051 dBm/3.84 MHz，Ior_dBm=−103.7dBm/3.84 MHz 时，BER 都是零，符合小于 0.001 的技术标准。

18.8　思考题

（1）Walsh 码是非常重要的正交码，如何利用 WCDMA3G 工具箱中的“WCDMA3G_OVSF”元件产生 Walsh 码？并设计仿真电路来考察该码对频谱的扩展作用。

（2）如何利用 ADS 建立一个射频连接信道从发射端到接收端传输 PN 序列？

（3）比较上行和下行信道的不同，总结利用 ADS 仿真信道应该注意的问题。

（4）本章仿真利用 TS 34.121-v3.1.0 和 TS25.101-v3.3.1 标准，请读者查阅相关资料。如果利用其他标准进行仿真，每个参数的具体设置如何修改？仿真结果有什么差别？

（5）非线性器件对测试指标的影响很大，请总结受其影响的原因。

参 考 文 献

[1] 冯新宇, 车向前, 穆秀春. ADS2009 射频电路设计与仿真. 北京: 电子工业出版社, 2010.
[2] 徐兴福. ADS2008 射频电路设计与仿真实例. 北京: 电子工业出版社, 2009.